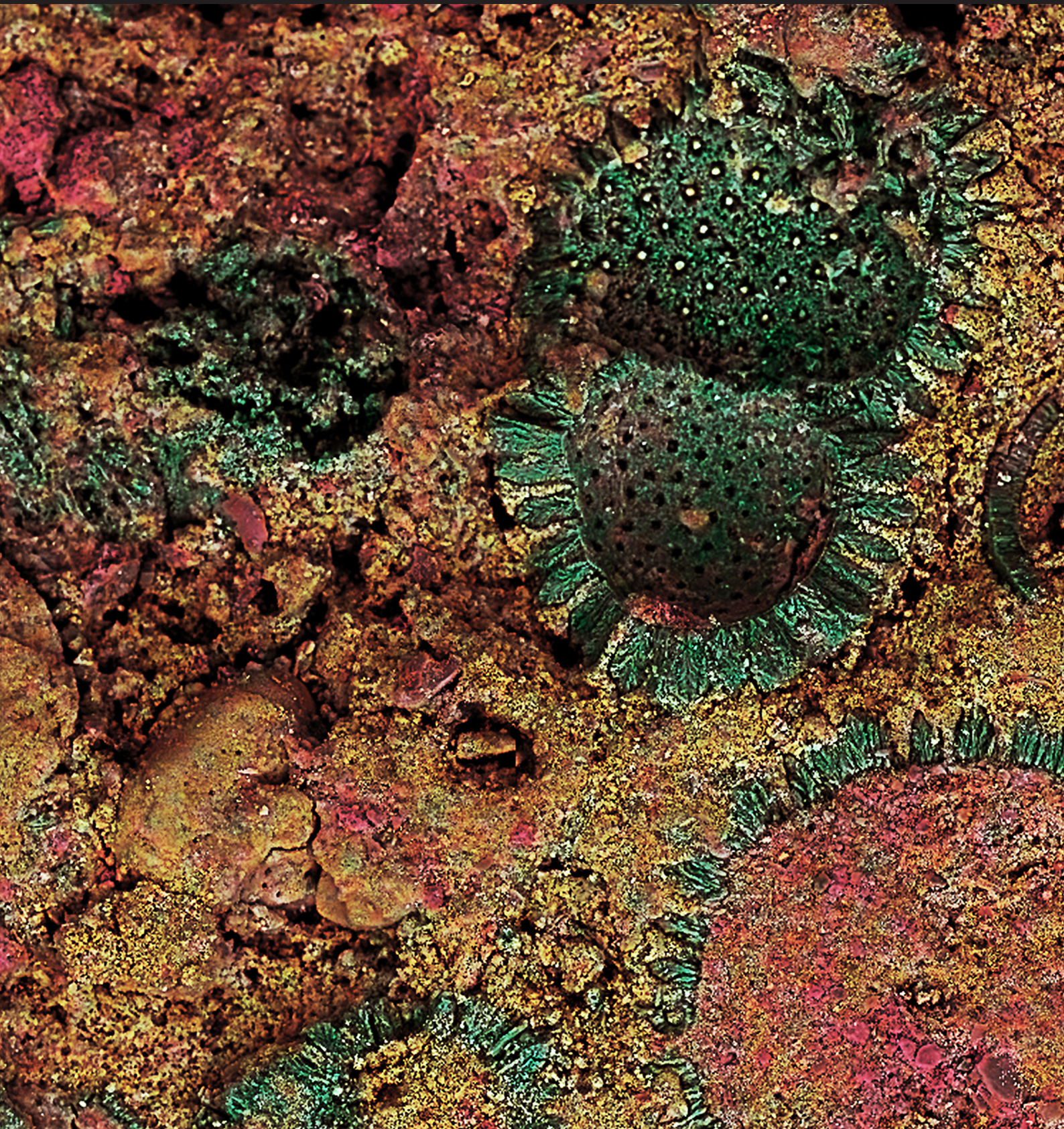


La Ciencia y el Arte VI

Ministerio
de Educación, Cultura
y Deporte

Ciencias experimentales
y conservación del patrimonio



Fotografía de portada:

Imagen de microscopía electrónica de foraminíferos, mineralizados por sales de cobre, en una moneda del tesoro de la fragata Nuestra Señora de las Mercedes.

Fotografía: José Vicente Navarro

La Ciencia y el Arte VI

Ciencias experimentales y conservación del patrimonio

Edición 2017

Dirección científica de la publicación:

Miriam Bueso

Instituto de Patrimonio Cultural de España

Dirección técnica del congreso

María Martín Gil. Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE).

José Manuel Menéndez. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de Madrid (ETSIT-UPM)

Coordinación del congreso

M.^a José Suárez. Museo Nacional de Antropología

Miriam Bueso. Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE)

Comité científico

Federico Álvarez García. Universidad Politécnica de Madrid.

Joaquín Barrio. Universidad Autónoma de Madrid.

Carmen Dávila. Escuela Superior de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Madrid.

Marián del Egado. Museo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Guillermo Enríquez de Salamanca. Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía.

Valentín García Baonza. Universidad Complutense de Madrid.

M.^a Isabel Herráez. Instituto de Patrimonio Cultural de España.

David Jiménez Bermejo. Universidad Politécnica de Madrid.

Maite Jover. Museo Nacional del Prado.

David Juanes. Subdirección de Conservación, Restauración e Investigación. IVC+R, CulturArts Generalitat.

Marina Martínez de Marañón. Instituto de Patrimonio Cultural de España.

Margarita San Andrés. Universidad Complutense de Madrid.

Emma Sánchez. Instituto de Patrimonio Cultural de España.



MINISTERIO DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE

Edita:

© SECRETARÍA GENERAL TÉCNICA
Subdirección General
de Documentación y Publicaciones

© De los textos e imágenes: sus autores

NIPO: 030-17-123-2

ISBN: 978-84-697-8851-6

DOI: 10.4438/030-17-123-2

ÍNDICE

Pág.

La evolución del análisis de pinturas y policromías. Experiencia en el IPCE	7
Marisa Gómez	

La ciencia y el patrimonio. Desafíos y oportunidades	22
María Martín Gil, José Manuel Menéndez y Miriam Bueso	

BLOQUE 1. TÉCNICAS DE ANÁLISIS APLICADAS A BIENES CULTURALES

La espectroscopia Raman portátil, una herramienta de diagnóstico en Patrimonio imprescindible en el futuro	37
Juan Manuel Madariaga	

Tecnología digital 3D aplicada a la documentación, reconstrucción y difusión del patrimonio cultural	53
Carlos Bayod	

RPAS o drones aplicados al patrimonio cultural: de la documentación geométrica a las imágenes multiespectrales	68
Jorge Angás y Paula Uribe	

Mappings: aumentar la realidad del patrimonio. El ejemplo de #Taüll1123	82
Albert Sierra	

Desarrollo de tecnologías para la detección precoz de contaminantes biológicos. Aplicaciones a vitrinas de aire y anoxia de aire	101
Nieves Valentín, Benigno Sánchez, Daniel Durán, Carmen Muro, M. ^a Isabel Herráez, Olga Vilanova, Julia Montero, Antonio Manrique y Álex Gaztañaga	

Nanomateriales antimicrobianos para la preservación del patrimonio cultural	120
Scott G. Mitchell, Sara Rivera-Fernández y Jesús M. de la Fuente	

Aportación de los estudios científicos a la restauración del Pórtico de la Gloria en la catedral de Santiago de Compostela: análisis de las alteraciones	134
Pedro Pablo Pérez, M. ^a Antonia García y Livio Ferrazza	

La restauración virtual. Aplicaciones a la conservación del patrimonio arqueológico	152
Francisco Javier Esclapés, Jaime Molina, Javier Muñoz, Laia Fabregat y Daniel Tejerina	

BLOQUE 2. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

Microscopía de fuerza atómica como herramienta de caracterización de superficies fotográficas	166
Alejandra Nieto, José Refugio Martínez, José Ángel de la Cruz, Juan Valcárcel, Gerardo Ortega, Azdrúbal Lobo y José Manuel Flores	

MHS, la herramienta de gestión patrimonial	182
Marian Chiriác, Juan Carlos Prieto, Jesús Castillo, Begoña García, José Carlos García, Alberto López, Daniel Basulto y Mario Tena	

Técnicas multivariantes y de realidad aumentada aplicadas a la difusión de arte rupestre	194
Berta Carrión, Silvia Blanco, José Luis Lerma y Esther López	
Sandstone, Heritage Documentation software. Aplicación a la restauración del Pórtico de la Gloria de la catedral de Santiago de Compostela	208
Iñaki Koroso	
La realidad aumentada aplicada a la conservación. Proyecto IVAPTA. Estudio y conocimiento de alteraciones en pintura sobre tela	221
María José González y Beatriz Prado	
Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: investigación y aplicación (CREMEL II)	237
Emilio Cano, Blanca Ramírez, Ana Crespo, David M. Bastidas, Teresa Palomar, Soledad Díaz, Emma García, Elena Martín y Gloria Pérez de Rada	
El proyecto de reconstrucción virtual de la ciudad ibérica de Ullastret	246
Ferran Codina, Gabriel de Prado, Isis Ruiz y Albert Sierra	
Uso de microfluorescencia de rayos X y otras técnicas nucleares no destructivas para el estudio de joyas y metales arqueológicos	255
Miguel Ángel Respaldiza, Simona Scrivano, Francisco J. Ager, Kilian Laclavetine, Blanca Gómez-Tubío e Inés Ortega-Feliu	
San Climent de Taüll. Análisis del proceso creativo	269
Núria Oriols, Paz Marquès y Mireia Mestre	
Estudio y análisis de los procesos de alteración por agentes microbiológicos en obras pictóricas sobre lienzo expuestas en claustros de conventos y monasterios del centro histórico de Quito, Ecuador	292
Fernando Poyatos, Rosa Morales, Lourdes Cevallos, Carla Freile y Fátima Morales	
Consolidación y adhesión de pintura vinílica: estudio de la viabilidad y comportamiento frente al envejecimiento de diversos polímeros	304
M. ^a Teresa Pastor Valls y David Juanes Barber	
Conservación y restauración del patrimonio paleontológico: innovación técnica en limpieza con láser y papetas en fósiles del yacimiento paleontológico de Lo Hueco	322
Manuel Blanco, Fátima Marcos, Paula Ruiz, Soledad Díaz y Francisco Ortega	

La evolución del análisis de pinturas y policromías. Experiencia en el IPCE

Marisa Gómez

Emérita IPCE

marisa.gomez@mecd.es

Resumen: El análisis de pinturas y esculturas policromadas es una de las especialidades integradas en el estudio de materiales del laboratorio encargado de la protección, conservación y restauración del Área de Investigación y Formación del Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). Dicho laboratorio ha recibido la herencia de los distintos organismos nacionales que se han ido sucediendo desde la creación del Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte y Etnología (ICROA). Los análisis realizados en esta especialidad han experimentado profundas transformaciones motivadas por las modificaciones administrativas del centro, la evolución tecnológica y la dilatada experiencia adquirida en el transcurso del tiempo.

Palabras clave: Análisis, laboratorio, pintura, escultura policromada, patrimonio cultural español.

Abstract: The analysis of paintings and polychrome sculptures is one of the specialties in the materials analysis laboratory of the Institute to the Spanish Cultural Heritage (IPCE), which is responsible for of the protection, conservation and restoration of the National Heritage. This laboratory has received the legacy from the different national agencies that have been succeeding since the creation of the Institute of Conservation and Restoration of Works of Art and Ethnology (ICROA). The analyses performed in this specialty have suffered important changes, caused by administrative modifications to the centre, but also took advantage of the technological developments and the extensive experience acquired in the course of time.

Keywords: Analysis, laboratory, painting, polychrome sculpture, Spanish Cultural Heritage.

Introducción

El laboratorio del Instituto del Patrimonio Cultural de España ha recibido la herencia de otros organismos nacionales que se han ido sucediendo en la protección, conservación y restauración del Patrimonio Artístico Nacional. El primero de estos organismos fue el Instituto Central de Restauración y Conservación (ICCR) constituido en el año 1961¹ y sustituido en 1971 por el Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte y Etnología (ICROA). Las funciones

¹ Decreto de creación del Instituto Central de Restauración y Conservación de Obras de Arte y Objetos de Arqueología y Etnología, publicado el 16 de noviembre de 1961 (BOE, de 7 de diciembre de 1961).

esenciales del laboratorio de análisis se mantuvieron cuando este organismo, junto con otros dedicados a la conservación y documentación del Patrimonio, se integró en el organigrama del Ministerio de Cultura, formando parte del Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC) creado por Real Decreto en 1985, con rango de Dirección General².

En 1996 Cultura y Educación se englobaron en un único Ministerio, incorporando al ICRBC en la Dirección General de Bellas Artes, pasando a llamarse Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE) y bajando de rango al de Subdirección en 1998. Los cambios de denominación y de nivel propiciaron que el Instituto centrara sus intervenciones en los bienes patrimoniales de titularidad estatal y eclesiástica, y asumiera las propuestas hechas por algunos Ayuntamientos, dejando en un segundo plano la relación con los organismos autonómicos e internacionales.

En el año 2008³ cambió nuevamente el nombre por el de Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). La intención esta vez era ampliar la acepción de los bienes patrimoniales a conservar, lograr mayor cooperación con otras administraciones y entidades públicas, compartir la documentación disponible y promover de nuevo los proyectos de investigación.

A pesar de que el estudio de las pinturas y policromías realizado en el laboratorio del centro de rango nacional como este ha sufrido muchos cambios en el tiempo para adaptarse a las nuevas ordenaciones administrativas y a los avances tecnológicos, ha logrado mantener algunos de sus objetivos prioritarios y su manera de gestionar el trabajo. El acceso directo a las obras y la profunda relación con los especialistas adscritos a otras secciones y servicios del Instituto han formado parte esencial de la metodología de estudio de las obras. El intercambio de datos con restauradores, historiadores, físicos, radiólogos, geólogos y biólogos de la institución ha contribuido a ahondar en los trabajos. El propósito de los análisis siempre ha sido llegar a un mayor conocimiento sobre la técnica material de ejecución, como base del estudio histórico y del diagnóstico del estado de conservación, identificando las causas de deterioro y proporcionar un asesoramiento continuo para la intervención y la preservación de los bienes objeto de estudio.

Antecedentes del laboratorio (ICCR e ICROA, 1971-1985)

El organigrama e instalaciones de los laboratorios del Instituto Central de Restauración y Conservación (ICCR) fueron diseñados por Paul Coremans, director del Instituto Real del Patrimonio Artístico de Bruselas (KIKIRPA) a partir de las relaciones entabladas con la Administración española en su estancia como comisionado de la UNESCO en 1963⁴. En 1965 el laboratorio inició su actividad con técnicas microscópicas y microquímicas (figura 1), recurriendo al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) para disponer de técnicas más complejas espectrográficas y cromatográficas. Sin embargo, no fue hasta 1971 cuando se instaló un laboratorio mejor equipado en los espacios cedidos por el Museo de América al Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte (ICROA). Allí comenzaron a hacerse los análisis de pinturas y policromías en diferentes soportes, priorizando el estudio científico de las causas de deterioro de las obras patrimoniales, partiendo de la toma de datos recopilada *in situ* (figura 2) y asesorando sobre los materiales y procesos empleados en sus intervenciones de restauración (figura 3).

² Real Decreto 565/1985, de 24 de abril.

³ Real Decreto 1132/2008, de 4 de julio.

⁴ Coremans, P. (1963): *L'Institut Central de Restauration. Mission Unesco e Espagne*, 6-26 octobre 1963. En <http://unesdoc.unesco.org/images/0015/001594/159416fb.pdf>



Figura 1. Primeras instalaciones del laboratorio del ICCR en 1970.

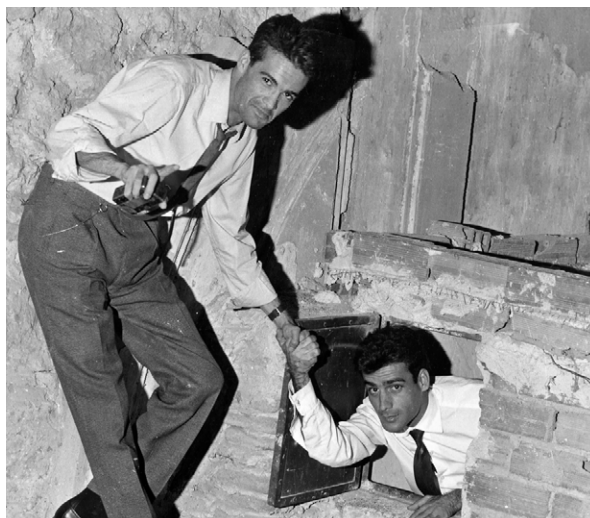


Figura 2. Visita de trabajo en la catedral de Cádiz de Matías Díaz Padrón (historiador) y José María Cabrera Garrido (químico).



Figura 3. Reunión del personal del laboratorio: Socorro Mantilla, José M.ª Cabrera y Alberto Rechiutto con don Gratiniano Nieto, director del ICCR entre 1968 y 1971.

El laboratorio del ICROA contó hasta 1985 con dos químicos como personal de plantilla dedicado a esta especialidad: José María Cabrera, director del laboratorio, que se ocupaba de las esculturas en piedra policromada y de las pinturas; y Alberto Rechiutto, de origen argentino, que se centraba en la escultura en madera policromada, probablemente por encontrar paralelos abundantes con la policromía barroca de su país. Ambos se encargaron de sentar las bases y realizar los análisis de las obras más importantes que llegaban al centro. Entre ellas destacan *El Entierro del Conde Orgaz* del Greco (VV. AA., 1977), numerosas pinturas de Pedro Berruguete y de Gallego, esculturas policromadas sobre madera del círculo de Alonso Cano, Martínez Montañés: la *Virgen de la Oliva* (Cabrera y Rechiutto, 1972), Juan de Juni: la *Virgen de las Angustias* (Rechiutto, 1972) y una escultura ibérica en piedra policromada, la *Dama de Baza* (Cabrera, 1973).

El laboratorio solo contaba inicialmente con reactivos, microscopios estereoscópicos y ópticos, para realizar estudios morfológicos y microanálisis a la gota. Más tarde se adquirieron un espectrómetro dispersivo de rayos IR, un espectrómetro de absorción atómica y, finalmente, un espectrómetro de fluorescencia de rayos X con una fuente de americio-241.

En los años ochenta, el trabajo de los especialistas del laboratorio fue dejando en segundo plano el trabajo analítico para encaminarse a dirigir *in situ* proyectos de restauración de obras de gran formato, como los retablos de Espera (Cádiz) y de Fuente el Saz (Madrid). Este cambio de tareas pudo deberse a que la escasez de recursos del laboratorio impedía responder a la creciente demanda de intervenciones en la institución o que el aislamiento de esta, comparada con otros centros europeos y norteamericanos, dificultaba cada vez más el seguimiento de los avances tecnológicos del sector.

Integración en el Ministerio de Cultura (ICRBC, 1985-1997)

Puede decirse que con la creación del Instituto de Conservación y Restauración de Bienes Culturales (ICRBC) se inició una nueva etapa en el análisis de materiales procedentes de las obras pictóricas y policromadas. El nuevo centro y con él los laboratorios se trasladaron a una sede definitiva en la calle Greco n.º 4 de la Ciudad Universitaria de Madrid.

Coincidiendo con esta profunda transformación estructural del Instituto, todos los científicos de plantilla del ICRBC dedicados al estudio de las obras patrimoniales se desvincularon del organismo recientemente fundado, solicitando excedencias o comisiones de servicio para trabajar en museos, y solo una persona del Servicio de Libros y Documentos se trasladó al laboratorio de la nueva institución.

Para solucionar este problema, Ignacio Gárate, director del centro en la etapa de transición, intentó convocar a los licenciados en ciencias que trabajaban en el Ministerio para aprovechar de este modo sus conocimientos en el examen del Patrimonio Cultural e hizo una propuesta de las necesidades, solicitando además tres plazas de licenciados en química, física y biología. Esto hizo que se planteara un concurso en 1985, inicialmente como oposición y más tarde como oferta pública de empleo, para proveer plazas de laborales especializados, oportunidad que supuso mi ingreso en la plantilla para ocuparme del análisis de materiales.

Más adelante, en 1988 y 1992, se convocaron otras cuatro plazas, esta vez para dos químicos, un geólogo y un ayudante en el laboratorio de análisis materiales (figura 4). En 1994 uno de los químicos pidió una excedencia indefinida, que no fue cubierta entonces.

La dirección del laboratorio corrió durante un breve tiempo a cargo de Socorro Mantilla, química que hasta el momento se había dedicado a dirigir la restauración de tejidos, a la que volvió poco después. Su papel consistió en arbitrar las relaciones con el director del Instituto, con los departamentos de restauración de la nueva entidad y con el nuevo personal incorporado.

Una vez finalizado el proceso de transferencias a las comunidades autónomas, el laboratorio se incluyó en el Área de Información e Investigación. En esa etapa, el director de Área, Ramón Romero Cabot instauró las reuniones mensuales para asignar los trabajos. La ejecución de estos tendría un seguimiento coordinado a través de una comisión formada por los especialistas del instituto responsables de las obras y los patronos de las comunidades autónomas y cofradías. En estas reuniones se decidían las fases y procedimientos a seguir en la intervención, estudios históricos y análisis, levantando acta donde constase la justificación de dichas resoluciones.

La misión del laboratorio de análisis de materiales, y con él la sección especializada en pinturas y policromías, era prestar asesoramiento técnico, transferencia de tecnología y forma-

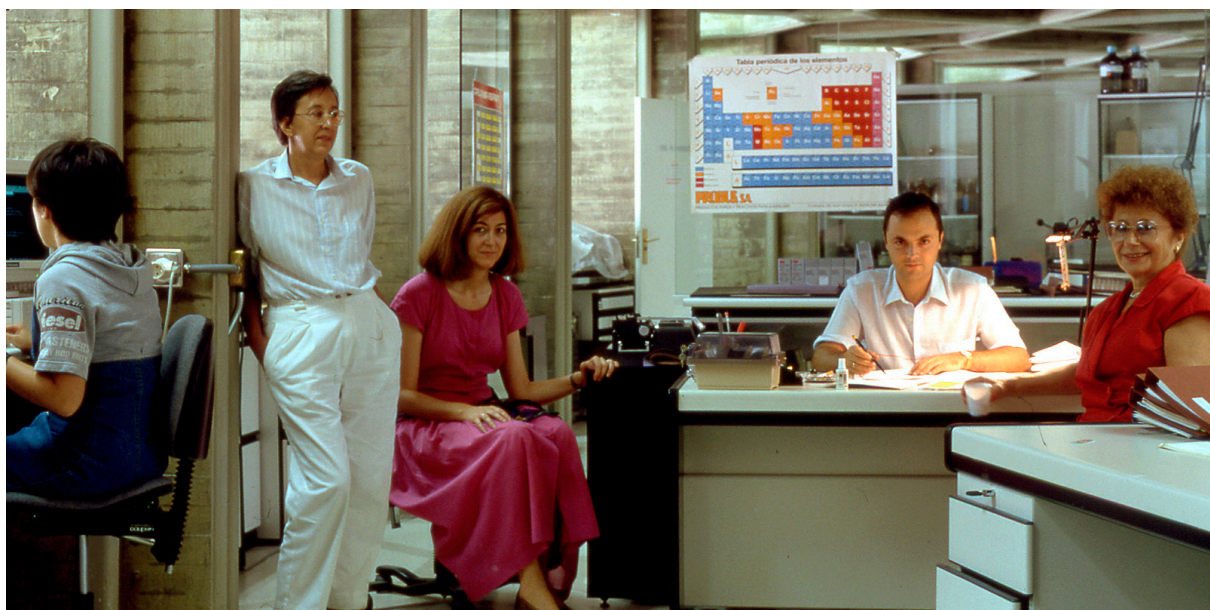


Figura 4. Plantilla del laboratorio del ICRBC en 1991.

ción especializada en las intervenciones de conservación y restauración. Se hacía hincapié en la diagnosis, la investigación y el estudio de criterios, métodos y técnicas de intervención en coordinación y cooperación con las distintas entidades autonómicas y con otros estados y organismos internacionales.

Aunque el laboratorio del ICRBC disponía de una ubicación estable, carecía de instalaciones, y la metodología y técnicas disponibles estaban claramente desfasadas. Fue necesario renovar paulatinamente los microscopios y adquirir nuevos equipos instrumentales. El primero de estos fue el espectrómetro de infrarrojos por transformada de Fourier; más tarde se adquirieron dos cromatógrafos de gases sucesivos con diferentes detectores, de ionización a la llama y de espectrometría de masas. Finalmente se compró un microscopio electrónico de barrido acoplado a un espectrómetro por dispersión de energías de rayos X.

El personal del laboratorio inició sus tareas en esta etapa con el estudio de una obra renacentista de gran formato, el retablo de El Espinar, de Giralte y Sánchez Coello, en cuyo contrato aparecían citados algunos de los materiales que debían emplearse (Gómez *et al.*, 1991). Para ello se contó con la colaboración del laboratorio de conservación de piedra y pintura mural de la Escuela Politécnica de Lausana, a donde tuve ocasión de desplazarme para realizar los análisis de aglutinantes. Dicho trabajo sirvió para perfilar los fundamentos de la interpretación de los datos analíticos con los que realizar un diagnóstico de las intervenciones de obras pictóricas de grandes dimensiones, tan abundantes en el ámbito peninsular y que nos permitieron continuar con el retablo de Colmenar Viejo, realizado por los mismos autores en una fecha posterior (Gómez, 1992). Una investigación que cabe destacar durante este periodo es la llevada a cabo en el seguimiento de la intervención de la techumbre del siglo XIII de la catedral de Teruel (VV. AA., 1999). Otro interesante proyecto fue el estudio previo de una obra singular, las yaserías renacentistas de los hermanos Corral de Villalpando (VV. AA., 1991), que decoraron en Medina de Rioseco la capilla de los Benavente de la iglesia de Santa María y las tribunas de la iglesia de San Francisco, la Casa Blanca de Medina del Campo, la capilla de los Reyes de la catedral de Palencia (figura 5) y la bóveda de la iglesia parroquial de Rodilana.



Figura 5. Toma de muestras en la catedral de Palencia.

Se estudiaron también obras de grandes autores. Entre ellas destacan numerosas pinturas del Siglo de Oro pertenecientes al Museo de Bellas Artes de Sevilla y colecciones madrileñas, y un conjunto de Francisco de Zurbarán compuesto por nueve pinturas del retablo de la Cartuja de Jerez expuestas en el Museo de Cádiz (VV. AA., 1998). Merecen especial alusión los análisis realizados de pinturas de Francisco de Goya, como los murales de San Antonio de la Florida, el gran lienzo de la Asunción de la iglesia parroquial de Chinchón (Gómez y Rodríguez, 1998) y los cuadros expuestos en los museos de Bellas Artes de Zaragoza y Lázaro Galdiano de Madrid (Gayo y Gómez, 1999).

Los trabajos y la metodología empleada en pinturas y policromías se han divulgado en cursos internacionales, congresos, jornadas, revistas y monografías. Entre los primeros se pueden mencionar los organizados por la Universidad Menéndez Pelayo en Santander en 1987, la Universidad Complutense en El Escorial en 1992 (figura 6) y la Asociación de Arquitectos Técnicos en Alcalá de Henares en los años 1994 y 1996.



Figura 6. Curso Internacional de Verano sobre Conservación del Patrimonio en El Escorial.

Paso a subdirección general (IPHE, 1998-2007 e IPCE, a partir de 2008)

El Instituto del Patrimonio Histórico Español (IPHE) disminuyó su autonomía de gestión al convertirse en una subdirección ministerial en 1998. Como consecuencia de esto, el laboratorio de análisis de los materiales de pintura y policromía adoptó una labor más pragmática, priorizando los estudios analíticos de los procesos de deterioro, la prevención de daños y el apoyo científico en la determinación del tratamiento a seguir en las intervenciones que se realizaban en el centro.

En el IPHE no se convocaron nuevas plazas de plantilla, a excepción de la dirección del laboratorio, a cargo de un funcionario del cuerpo de conservadores de museos, y solo se disponía de la ayuda de becarios y contratos temporales. Sin embargo, esta estrategia organizativa favoreció la gestión, logrando que el laboratorio de análisis de materiales se trasladara en el año 2000 a un nuevo espacio del mismo edificio que mejoraba las exigencias de higiene y seguridad para el personal y la instrumentación. La dotación económica asociada al traslado sirvió para que las instalaciones se renovaran y modernizaran y se adquirieran equipos instrumentales, adecuándolos a la tecnología de otras entidades europeas dedicadas al estudio de los bienes culturales (figura 7).

Dos años más tarde, la creación de un laboratorio en el Museo del Prado condujo al traslado a este organismo de uno de los licenciados en química.

En esta etapa se estudiaron retablos escultóricos tardogóticos y renacentistas de grandes dimensiones (Gómez Espinosa y Gómez González, 2005), entre los cuales cabe destacar, en madera policromada, el retablo mayor de la catedral de Toledo (Gómez *et al.*, 2004) y el de San Pablo de Zaragoza (Gómez, 2009) y, en alabastro policromado, los conjuntos aragoneses y el de la Cartuja de El Pualar en Madrid (Gómez *et al.*, 2000; Gómez Espinosa y Gómez González, 2007). El trabajo se dirigió también a retablos barrocos madrileños con pinturas y esculturas, como el de la iglesia de San Plácido, de Claudio Coello y los hermanos De la Torre, el de las Mercedarias (Bruquetas y Gómez, 2003), de los mismos escultores y Juan de Toledo como pintor, y el de la Concepción Real de Calatrava, de José de Churriguera, así como en otros retablos del sur peninsular como los de Lucena (Carrassón *et al.*, 2003), Carmona y la iglesia de San Francisco, de Granada.



Figura 7. Vista general de las instalaciones del laboratorio del IPHE en el año 2000.

También se hizo el seguimiento de la intervención de pinturas murales de Goya, como la Regina Martirum en la catedral de Zaragoza, las últimas fases de la restauración en San Antonio de la Florida en Madrid, los trabajos sobre el cuadro de Fernando VII a caballo de la Real Academia de Bellas Artes de Madrid (figura 8) y el estado de conservación del retrato de Jovellanos del Museo de Bellas Artes de Asturias (Gayo, 2005; Gayo *et al.*, 2008; Bruquetas *et al.*, 2008; Kroustalis *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2015a). Se hizo un estudio comparativo de los vestigios de policromía en dos esculturas ibéricas (figura 9), las damas de Baza y de Elche (Gómez *et al.*, 2008b; Gómez *et al.*, 2010b; Gómez *et al.*, 2011). La remodelación del Museo del Greco en Toledo permitió el estudio comparativo y pormenorizado de su Apostolado, la Vista de Toledo y otras obras del pintor.

Algunos de estos trabajos se han publicado en revistas del Ministerio y otros se han presentado en congresos y jornadas internacionales. Entre estos destacan el Congreso de París y el de Lille, el Curso de Ciencias Experimentales en Cartagena de Indias en 2007 y el de Retablos en Lima en 2008, organizados por el Ministerio de Cultura y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

Cabe citar también la participación en dos proyectos internacionales. El primero de ellos, de 2000 a 2003, denominado «POLICROMIA. A Escultura Policromada Religiosa dos Séculos XVII e XVIII. Estudo comparativo das técnicas, alterações e conservação em Portugal, Espanha e Bélgica» (figura 10), integrado en el Programa Raphael (VV. AA., 2004). El segundo, dentro



Figura 8. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) realizado en los almacenes de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid.

del marco Eu-Artech en la sección MOLAB, supuso la participación en 2005 en el estudio de la portada de la catedral de Huesca con técnicas no invasivas (García y Gómez, 2005). También colaboramos en el proyecto de «Estudio científico de patrones referencia de materiales y técnicas de ejecución de la pintura novohispana» (PAPIIT) con el Laboratorio de Diagnóstico de Obras de Arte (LDOA) de la Universidad Autónoma de México en 2008 (figura 11).

Cuando el IPHE pasó a llamarse Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) en 2008, el centro se planteó la necesidad de sistematizar los criterios, metodologías y técnicas empleadas en los trabajos y contribuir a la formación especializada de expertos integrantes en la conservación y restauración del Patrimonio de titularidad estatal. El laboratorio de análisis de materiales y el examen con métodos físico-químicos de imagen de pinturas y policromías se integraron en el Área de Investigación y Formación. Este cambio trajo consigo el nombramiento de funcionarios del Cuerpo de Ayudantes de Conservadores de Museos para los nuevos servicios. En este período se inició el encadenamiento de jubilaciones, precisamente en un momento en que la política de la Administración del Estado era la de amortizar la mayor parte de las plazas de contratados laborales. Únicamente se logró convocar una plaza de licenciado en químicas y un concurso de traslados para tres técnicos de laboratorio y dos auxiliares.

El crecimiento piramidal del organigrama multiplicó la parte asociada a las gestiones administrativas. En lo que se refiere al trabajo analítico, se añadieron nuevas tareas a las que hasta el momento se dedicaban a la interpretación de resultados y elaboración de informes de asesoramiento para los trabajos del centro. Entre



Figura 9. Personal del laboratorio del IPHE que realizó el análisis FRX en los almacenes del Museo Arqueológico Nacional de Madrid.



Figura 10. Reunión de trabajo en Madrid del grupo del proyecto «POLICROMIA» del programa Raphael en 1991.



Figura 11. Estudio de una pintura en la catedral de México realizado por personal de la Universidad Autónoma de México en colaboración con el IPCE.

ellas pueden citarse las derivadas de la colaboración en proyectos de investigación con las universidades y otros organismos autonómicos e internacionales, y el incremento de la participación en cursos, publicaciones y la formación de nuevos especialistas. Para solucionar el incremento de los trabajos entraron con carácter temporal becarios y contratados asociados a los proyectos que tuvieron la oportunidad de adquirir una experiencia curricular, inexistente en las facultades de Ciencias de las universidades españolas.

Con la crisis económica de la Administración española se han ido amortizando las plazas de laborales jubilados y no parece que se hayan previsto nuevas convocatorias libres. Por este motivo las personas vinculadas temporalmente al laboratorio del Instituto carecen de otras posibilidades de ejercicio profesional que no sea la emigración a otras comunidades autónomas o países que apuesten por aplicar los avances tecnológicos al estudio del Patrimonio aprovechando el bagaje adquirido por un personal tan cualificado.

El impulso concedido por parte de la administración del centro para gestionar proyectos de investigación no ha supuesto incrementar la plantilla, sino ofrecer contratos temporales adscritos a los convenios con otras administraciones públicas, entre ellas la Universidad española. Uno de los trabajos internos de mayor relevancia en este momento, realizado por el personal de los laboratorios, ha sido el estudio comparativo de obras de Zurbarán, centrado en la información recopilada en la serie jerónima de la sacristía del monasterio de Guadalupe. Un interesante proyecto ha sido el de «Evaluación de productos utilizados en conservación y restauración de bienes culturales» (POLYEVART), de tres años, realizado gracias a un convenio con la Universidad Complutense de Madrid de 2008 a 2012 y prorrogado hasta 2015 (figura 12) con cargo a un proyecto I+D. POLYEVART (Chércoles *et al.*, 2009; San Andrés *et al.*, 2009; San Andrés *et al.*, 2011) se ha codirigido entre el laboratorio de materiales y el departamento de pintura de la Facultad de Bellas Artes, con la intervención de los servicios de restauración de Bienes Muebles y de Libros y Documentos. Otros proyectos de investigación de los últimos años ha sido el de la técnica de Sorolla en obras albergadas en el museo madrileño dedicado al pintor, el de Bellas Artes de Oviedo, la colección de la Universidad Complutense de Madrid y la Hispanic Society de Nueva York (Juanes *et al.*, 2008; Gómez *et al.*, 2015b). A través del Proyecto I+D «Formación del pintor y práctica de la pintura en los reinos hispanos (1350-1500)»



Figura 12. Reunión de trabajo del grupo POLYEVART en el IPCE en 2012.

se han publicado trabajos sobre retablos tardomedievales de Berruguete, Fernando y Francisco Gallego, y anónimos como el de san Juan de Santo Domingo de la Calzada (Gómez y Jover, 2008a; Gómez, 2010; Gómez *et al.*, 2015c; Kroustalis *et al.*, 2016; Gómez y Albar, 2016). Finalmente, todo el grupo investigador se ha centrado entre 2013 y 2015 en el estudio del retablo de Santiago en la capilla Luna de la catedral de Toledo (Miquel *et al.*, 2015).

Los proyectos de investigación de esta última etapa han supuesto la incorporación de cámaras de envejecimiento de radiación y de humedad-temperatura, el acoplamiento de un microscopio y un dispositivo de reflectancia atenuada al espectrómetro de infrarrojos; la adquisición de un equipo de pirólisis-gases-masas, de un cromatógrafo líquido con detectores de diodo array y de tiempo de vuelo y de un microscopio electrónico de barrido que trabaja a vacío y a presión variable, acoplado a un analizador por dispersión de energías de rayos X (figuras 13 y 14).

También se ha generado en los últimos años una base de datos en la que se registran las pinturas y policromías analizadas, las muestras extraídas, su ubicación en el laboratorio, los archivos creados en los equipos instrumentales, las carpetas con los procedimientos analíticos, los datos y los informes correspondientes (figura 15).

Para terminar, hay que resaltar que la creación en el IPCE de los Servicios de Formación y de Difusión ha propiciado la divulgación de los trabajos más interesantes y los proyectos de investigación a través de cursos, seminarios y publicaciones.

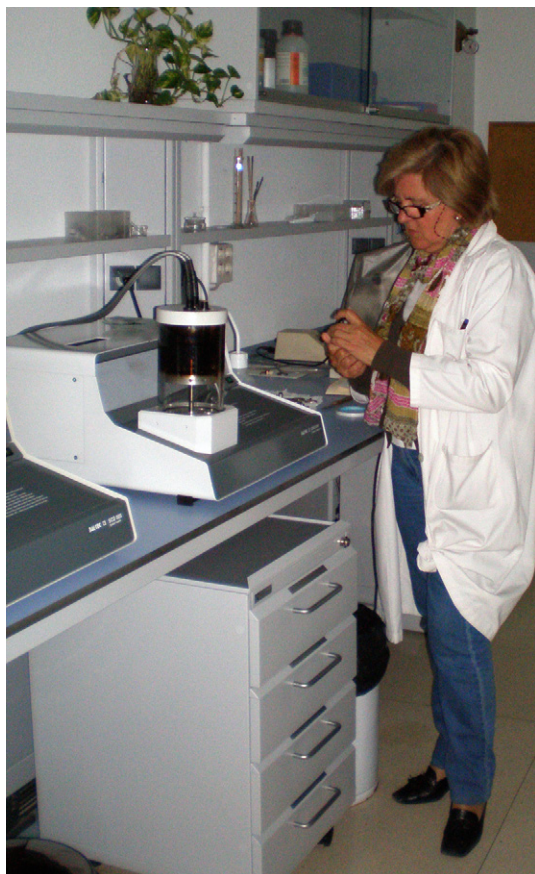


Figura 13. Preparación de muestras para microscopio electrónico de barrido.

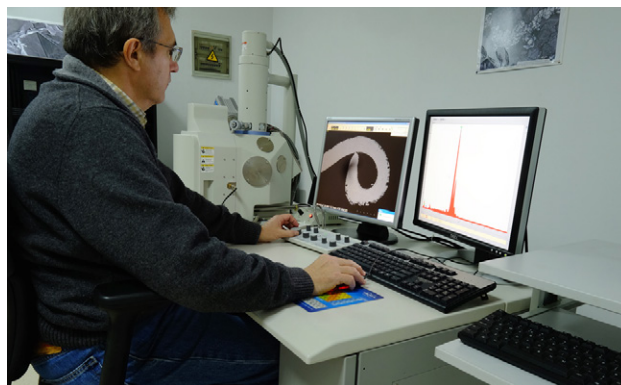


Figura 14. Análisis de muestras por SEM-EDX.



Figura 15. Documentación y alimentación de la base de datos del archivo de muestras de la sección de Análisis de Materiales.

Conclusiones

La finalidad de este trabajo es reflexionar sobre algunas de las aportaciones más relevantes del legado del laboratorio del actual Instituto del Patrimonio Cultural de España y contribuir a ofrecerle un reconocimiento profesional de acuerdo con sus méritos.

A lo largo de los años, los cambios administrativos han repercutido indudablemente en la orientación de los estudios de las pinturas y policromías desarrollados en el laboratorio de análisis de materiales del IPCE. Cabe destacar también que en este tiempo han tenido lugar importantes transformaciones en el avance de las técnicas analíticas y en la complejidad de los datos obtenidos. La proximidad con las obras y una actitud consciente y profunda vinculada al diagnóstico han sido fundamentales en la interpretación de los datos analíticos y su aplicación a la pervivencia de los bienes objeto de estudio compartidos con todo el personal de los laboratorios del Centro. Quiero finalizar haciendo hincapié en que este enfoque y la experiencia acumulada han sido los puntos fuertes de las tareas efectuadas en el dominio de las pinturas y policromías dando un valor global y cercano a la investigación sobre la materialidad de las obras patrimoniales objeto de estudio frente a otras visiones más parciales y teóricas emprendidas por otras entidades científicas académicas.

Agradecimientos

Quiero destacar la labor de todas las personas del laboratorio y otros departamentos del ICROA, ICRBC, IPHE e IPCE que han intervenido en estos trabajos. Igualmente a las personas de otras entidades que han aportado su tiempo y sus conocimientos a través de proyectos y convenios de colaboración con nuestra institución. Los nombres de muchos de ellos son mencionados en la bibliografía adjunta.

Bibliografía

- CABRERA, J. M.^a, y RECCHIUTO, A. (1972): «Study of the materials and technique of the polychromated sculpture Virgin de la Oliva by Alonso Cano, Spanish XVII century», *The International Council of Museums, Committee for Conservation*, Madrid.
- CABRERA GARRIDO, J. M.^a (1973): «Conservación y restauración de una escultura ibérica en piedra policromada del siglo IV a J. C.». *Boletín Instituto Central de Restauración de Obras de Arte, Arqueología y Etnología* (ICROA) 12: 23-33.
- BRUQUETAS GALÁN, R., y GÓMEZ, GONZÁLEZ, M. (2003): «El retablo mayor de las Mercedarias de don Juan de Alarcón». *Bienes Culturales. Revista del Instituto de Patrimonio Histórico Español. Retablos*, 2: 101-115. Madrid: Instituto del Patrimonio Histórico. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- BRUQUETAS, R.; GABALDÓN, A.; ANTELO, T.; VEGA, C.; GÓMEZ, M.; MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M.; JUANES, D., y BUESO, M. (2008): «Estudio técnico de la pintura de Francisco de Goya "Fernando VII a caballo"». *Bienes Culturales*, 8: 117-132. Madrid: Ministerio de Cultura.
- CARRASSÓN LÓPEZ DE LETONA, A.; GÓMEZ ESPINOSA, T., y GÓMEZ GONZÁLEZ, M. (2003): «Retablo mayor de la iglesia de San Mateo de Lucena». *Bienes Culturales. Revista del Instituto de Patrimonio Histórico Español. Retablos*, 2: 149-163. Madrid: Instituto del Patrimonio Histórico. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.
- CHÉRCOLES, R.; SAN ANDRÉS, M.; DE LA ROJA, J. M., y GÓMEZ, M. L. (2009): «Analytical characterization of polymers used in conservation by ATR FTIR Spectroscopy». *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395 (7): 2081-2096.

- GARCÍA, M. A., y GÓMEZ, M. (2005): «Portada de la Catedral de Huesca. Análisis de la policromía». II Congreso del GEIIC, *Investigación en Conservación y Restauración*. Barcelona, pp. 147-154.
- GAYO GARCÍA, M. D., y GÓMEZ GONZÁLEZ, M. L. (1999): «Análisis químicos» *Goya en la Fundación Lázaro Galdiano*. Madrid: Fundación Lázaro Galdiano.
- GAYO, D. (2005): «La azurita identificada en pinturas murales al fresco de Goya». *Investigación en conservación y restauración: II Congreso del Grupo Español del IIC*, 154-7.
- GAYO, M. D.; GARCÍA M. A.; ALGUERÓ, M., y ARTEAGA, M. (2008): «Estudio de los materiales originales y añadidos en las pinturas murales de San Antonio de la Florida», en J. M. PITA ANDRADE, (coord.), *San Antonio de la Florida y Goya: la restauración de los frescos*, 277-282.
- GÓMEZ, M. (2010a): «Estudio analítico de la técnica pictórica. Aplicación a tablas y retablos españoles», en *La pintura europea sobre tabla en los siglos XV, XVI y XVII: estudios técnicos*, Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 148-159.
- GÓMEZ ESPINOSA, T., y GÓMEZ GONZÁLEZ, M. (2007): «La policromía». *Retablo Mayor de Santa María de El Pualar*. Madrid: Instituto del Patrimonio Histórico Español, pp. 141-163.
- (2005): «Policromía tardogótica española». *A modo da Flandres. Disponibilidade, Inovação e Mercado da arte (1415-1580)*. Madrid: Fernando Villaverde Ediciones, S. L., Fundación Carlos de Amberes, pp. 265-278.
- GÓMEZ GONZÁLEZ, M. (2009): «Anàlisi d'un ric repertori de tècniques de policromia: el retaule major de l'església de Sant Pau de Saragossa». *Revista de l'Escola Superior de Conservació i Restauració de Bens Culturals de Catalunya*, 8, Barcelona: UNICUM, pp. 74-83.
- GÓMEZ GONZÁLEZ, M. L.; PANCELLA, R., y BART, R. (1991): «Examen científico de la policromía y la pintura del retablo» y «Examen científico de la cortina pintada». *El Retablo y la sarga de San Eutropio de El Espinar*. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos. Instituto de Conservación y Restauración de los Bienes Culturales (ICRBC), pp. 125-142 y 174-175.
- GÓMEZ GONZÁLEZ, M. L. (1992): «Evolución técnica y variaciones de los materiales de dos retablos del mismo autor: Colmenar Viejo y El Espinar». *Actas Congreso Nnal. Madrid en el contexto hispánico desde la época de los descubrimientos*, tomo II, Madrid, pp. 1357-1368.
- GÓMEZ GONZÁLEZ, M., y RODRÍGUEZ TORRES, M. T. (1998): «La Asunción de Goya de la Parroquial de Chinchón: estudio histórico y técnico». *Congreso Internacional. Pintura Española siglo XVIII, Actas*. Madrid: Fundación Museo del Grabado Español Contemporáneo, pp. 515-528.
- GÓMEZ, M.; GAYO, L., y LÓPEZ, A. (2000): «Albâtre polychrome des XVème et XVIème siècles en Espagne. Caractérisation des Matériaux». *Art et Chimie. La couleur*. París, 1998. Actes du Congrès, pp. 80-87.
- GÓMEZ, M.; ALGUERÓ, M., y GARCÍA, M. A. (2004): «Matériaux et technique de la polychromie du grand retable de la cathédrale de Tolède». *Retables in situ. Conservation & restauration*, 11^{es} journées d'étude de la SFIIC, Roubaix (France). Actes des 11^{es} journées d'étude de la SFIIC, pp. 101-110.
- GÓMEZ, M. L., y JOVER DE CELIS, M. (2008a): «Fernando Gallego en Trujillo: estudios químicos». *Bienes Culturales*, 8: 49-60. Madrid: Ministerio de Cultura.
- GÓMEZ, M. L.; JUANES, D.; NAVARRO, J. V.; MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M.; ALGUERÓ, M. L.; GONZÁLEZ, E., y ARTEAGA, A. (2008b): «Revisión y actualización de los análisis de la Dama de Baza. Comparación con la Dama de Elche». *Bienes Culturales. Revista del Instituto de Patrimonio Histórico Español*, 8: 211-222.
- GÓMEZ, M.; PÉREZ P. P.; CHÉRCOLES, R., y GONZÁLEZ, E. (2008c): «Museo Sorolla: estudio material de la colección de pintura». *Conservación de Arte Contemporáneo*. 9.^a Jornada en MNCARS, Madrid, pp. 83-99.

- GÓMEZ, M.; NAVARRO, J. V.; MARTÍN DE HIJAS, C.; DEL EGIDO, M.; ALGUERÓ, M.; GONZÁLEZ, E., y ARTEAGA A. (2010b): «La Dama de Baza. Un viaje femenino al más allá». *Actas del encuentro Internacional. Museo Arqueológico Nacional-La escultura de Baza: materias pátinas y policromías*. Madrid: Ministerio de Cultura, pp. 103-117.
- GÓMEZ, M., y SAN ANDRÉS, M. (2010c): «Metodología de análisis físico-químicos en grandes superficies». *La Ciencia y el Arte II. Ciencias Experimentales y Conservación del Patrimonio Histórico*. Madrid: Web Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 94-112.
- GÓMEZ, M. L.; NAVARRO, J. V., y ALBAR, A. (2011): «El color en la escultura ibérica a la luz de los análisis físico-químicos: los ejemplos de las damas de Baza y Elche». *¿Hombres o dioses?: una nueva mirada a la escultura del mundo ibérico*. Museo Arqueológico Regional, Alcalá de Henares, Madrid, del 8 de julio al 16 de octubre de 2011, pp. 315-338.
- GÓMEZ, M.; BRUQUETAS, R., y ALBAR, A. (2015a): «Dos retratos superpuestos de Goya en la obra de Gaspar Melchor de Jovellanos (Museo de Bellas Artes de Asturias). Estudio material». *Informes y trabajos*, 10. Madrid: Web Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 96-114.
- GÓMEZ, M., PÉREZ, P. P., y BORREGO, P. (2015b): «Estudio comparativo de preparaciones y pigmentos industriales empleados en paisajes de Joaquín Sorolla del Museo de Bellas Artes de Asturias». *Ciencia y arte V. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid: Web Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 136-150.
- GÓMEZ, M., PÉREZ, P. P.; SANYOVA, J.; ARTEAGA, A.; ALGUERÓ, M., y GONZÁLEZ E. (2015c): «Estudio científico y técnico de la pintura y la policromía de un retablo tardogótico anónimo. El Retablo de San Juan de la Catedral de Santo Domingo de la Calzada». *Informes y Trabajos*, 13: 79-98.
- GÓMEZ, M., y ALBAR, A. (2016): «Materialidad y técnica en la obra de Fernando Gallego. El retablo de San Ildefonso de la catedral de Zamora». *Ver y Crear. Obradores y mercados pictóricos en la España gótica (1350-1500)*. Madrid: La Ergástula ediciones, Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 43-62.
- JUANES, D.; GÓMEZ, M.; ALGUERÓ, M., y ARTEAGA, A. (2008): «La paleta de Sorolla a través de algunas pinturas analizadas de Museos y Colecciones». *Bienes Culturales, Revista del Instituto de Patrimonio Histórico Español*, 8: 133-146.
- KRUSTALLIS, S.; GÓMEZ, M., y BRUQUETAS, R. (2010): «In quest for vermillion: production, comerse and use of the pigment in XVIIIth century. Spain». *Studying Old Master Paintings-Technology and Practice*, Londres: The National Gallery Technical Bulletin 30th Aniversary Conferency, National Gallery, pp. 277-283.
- KROUSTALLIS, S.; GÓMEZ GONZÁLEZ, M.; MIQUEL JUAN, M.; BRUQUETAS GALÁN, R., y PÉREZ MONZÓN, O. (2016): «Gilding in Spanish panel painting from the fifteenth and early sixteenth centuries». *Journal of Medieval Iberian Studies*, 8: 313-343.
- MIQUEL, M.; VEGA, C.; GÓMEZ, M. L.; ALBAR, A.; ANTELO, T.; BUESO, M., y PÉREZ, O. (2015): «Formación del pintor y práctica de la pintura en los reinos hispanos (1350-1500). El retablo de Santiago en la capilla Luna de la Catedral de Toledo». *Ciencia y arte V. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid: Web Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 250-266.
- RECCHIUTO, A. (1972): «La Virgen de las Angustias de Juan de Juni, estudio para su conservación y restauración». *Informes y Trabajos del Instituto de Conservación Restauración de Obras de Arte, Comunicaciones del ICCR* presentadas en la Reunión del Comité Internacional para la Conservación de Bienes Culturales, 12. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, pp. 5-22.
- (1982): «Restauración del retablo Mayor de la Iglesia de Santa María de Gracia, Espera (Cádiz)». *Informes y Trabajos del Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte*, 14.

Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes, Archivos y Bibliotecas, pp. 9-25.

- SAN ANDRÉS, M.; CHÉRCOLES ASENSIO, R.; GÓMEZ GONZÁLEZ, M. L., y DE LA ROJA, J. M. (2009): «Materiales sintéticos utilizados en la manipulación, exposición y almacenamiento de obras de arte y BBCC. Caracterización por espectroscopía FTIR-ATR». *10.ª Jornada de Arte Contemporáneo en MNCARS*, Madrid, pp. 33-52.
- SAN ANDRÉS, M.; GÓMEZ, M.; CHÉRCOLES R.; DE LA ROJA, J. M., y DEL EGIDO, M. E. (2011): «Propuesta de evaluación de materiales poliméricos usados en la conservación de objetos patrimoniales». *Ciencia y arte III. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio. Teoría, práctica e innovación en la conservación del patrimonio*. Madrid: Ministerio de Cultura, Instituto del Patrimonio Cultural de España, pp. 217-238.
- VV. AA. (1977): «El entierro del Conde Orgaz». *Informes y Trabajos del Instituto de Conservación y Restauración de Obras de Arte*, 13. Madrid: Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes. Instituto de Conservación y Restauración de los Bienes Culturales (ICRBC).
- VV. AA. (1991): *La obra en yeso policromado de Los Corral de Villalpando*. Ministerio de Cultura. Dirección General de Bellas Artes y Archivos.
- VV. AA. (1998): *Zurbarán. Estudio y conservación de los monjes de la Cartuja de Jerez*. Madrid: Banesto y Ministerio de Educación y Cultura.
- VV. AA. (1999): *Techumbre de la Catedral de Teruel. Restauración*. Diputación General de Aragón, Ministerio de Educación y Cultura, Caja de Ahorros de la Inmaculada de Aragón, Cabildo de la Catedral de Teruel.
- VV. AA. (2004): *Policromia. A escultura policromada religiosa dos séculos XVII e XVIII. Estudo comparativo das técnicas, alterações e conservação em Portugal, Espanha e Bélgica. Actas do Congresso Internacional Lisboa 2002*. União Europeia Programa Rafael – IPCR – IAPH – IRPA, Lisboa.

Ciencia y Patrimonio. Desafíos y oportunidades

María Martín Gil

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).
maria.martingil@mecd.es

José Manuel Menéndez

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (ETSIT-UPM).
jmm@gatv.ssr.upm.es

Miriam Bueso Manzananas

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).
miriam.bueso@mecd

Resumen: Las aportaciones de la investigación en la conservación del patrimonio cultural gozan hoy en día de un reconocimiento que parece estar fuera de debate. Son numerosos los ejemplos en los que las ciencias experimentales han contribuido a un mejor conocimiento de la materialidad, la tecnología empleada en la creación, y del estado y los procesos asociados a la degradación de los bienes culturales. La aplicabilidad directa de estos avances sobre una mejor conservación del patrimonio solo se consigue desde una perspectiva de coordinación y colaboración de equipos interdisciplinarios, lo que supone ciertas dificultades a la hora de desarrollar líneas de actuación concretas. Esta situación será analizada, así como algunas de las iniciativas promovidas desde las distintas administraciones internacionales y nacionales que tienen por objeto la puesta en valor de la investigación en conservación del patrimonio.

Palabras clave: Investigación, conservación, patrimonio cultural, centros de conservación, interdisciplinariedad.

Abstract: The contribution of science in the conservation of cultural heritage is actually out of debate. There are multiple examples in which experimental sciences have contributed to a better understanding of the materiality of the cultural items; the technology of the creation; and the actual state and the degradation processes. The implementation of those developments for a better heritage conservation needs an interdisciplinary perspective, with the coordination and cooperation of a working team with specialists from different disciplines. The difficulties for applying these action lines will be analyzed in this report, together with some international and national initiatives that foster heritage science.

Keywords: Research, conservation, cultural heritage, conservation institutes, interdisciplinarity.

Ciencia y patrimonio

¿En qué consiste la ciencia aplicada al patrimonio? ¿Qué es lo que un restaurador espera de ella para que realmente le resulte de utilidad en su trabajo diario y le resuelva problemáticas ante las que se tiene que enfrentar? ¿Cuáles son los retos que se marca el científico al aplicar su disciplina propia a la conservación del patrimonio? ¿Qué dificultades se encuentra? Al reflexionar sobre los desafíos y oportunidades de la conservación científica, y la vinculación entre la ciencia y el patrimonio, inevitablemente surgen numerosos aspectos que analizar y detallar.

La ciencia aparece vinculada al patrimonio en las diferentes aportaciones a la técnica constructiva de las obras de arte, los diferentes tratamientos aplicados y en el desarrollo de las técnicas de análisis que permiten profundizar en un mejor conocimiento de los bienes culturales. Cabe también reflexionar sobre cuál es el origen de este interés por ahondar en el conocimiento profundo de la obra de arte, así como la situación actual de esta relación entre patrimonio y ciencia.

Una cuestión que subyace a todos estos aspectos, la base sobre la que se sustentan, es el valor que se otorga al patrimonio cultural. En la mayoría de las ocasiones, y sin duda así ocurre en este caso, cuanto mayor es el conocimiento en una determinada disciplina o materia, mayor es el valor que se le reconoce, sea cual sea su tipología. En el caso del patrimonio son múltiples las facetas que conforman este valor: desde el histórico y documental, hasta el estético, así como su potencial como motor de desarrollo económico ligado al impulso de actividades artísticas, culturales y turísticas, sin olvidar la identificación personal y cultural. Asimismo, existe una premisa común a todos estos aspectos que está asociada al disfrute ante la contemplación de una obra de arte, siendo un derecho de la sociedad actual hacer uso de él y una obligación de las entidades gestoras preservar el patrimonio para las generaciones futuras. En este aspecto el papel de la ciencia y la investigación resulta fundamental, ya que no busca otra cosa que aumentar este conocimiento del patrimonio, de las obras de arte.

En este panorama, y con un pasado muy escindido de los parámetros y factores que tradicionalmente se identificaban con el patrimonio, aparecen las ciencias experimentales como una herramienta clave para el avance del conocimiento. Si bien la ciencia del patrimonio es una disciplina relativamente joven, siendo un hito en su historia la creación del primer laboratorio en un museo en el año 1888 en el *Königliche Museum Berlin* bajo la dirección de Friedrich Rachtgen, hoy en día están fuera de discusión las importantes aportaciones de la química, la física, la biología, la geología, las ciencias ambientales, etc., a los procesos de conservación y restauración de los bienes culturales, y su necesidad para tener un conocimiento profundo de estos. Estas funciones se desarrollan a nivel mundial en diferentes centros de conservación, institutos especializados, laboratorios asociados a museos, universidades, etc.

Funciones de la investigación en conservación

Resulta difícil definir y acotar estas aportaciones de la investigación en conservación. En una primera aproximación podríamos hablar de cuatro bloques de funciones:

Mejora del conocimiento del bien cultural

El primer paso a la hora de afrontar una intervención o un proceso de conservación en general es saber a qué nos enfrentamos. Resulta clave conocer la materialidad del bien. En este sentido, las ciencias experimentales juegan un papel fundamental en la identificación de mate-

riales constituyentes, una información que no siempre es apreciable a la visión directa. Son numerosas y variadas las técnicas de análisis empleadas. Así, el microanálisis de energías dispersadas EDX, la fluorescencia de rayos X, la observación con microscopios ópticos y las diferentes técnicas de análisis instrumental como son la espectroscopía infrarroja, las cromatografías (de gases y líquidos) o la difracción de rayos X, fundamentalmente. El estudio con estas mismas técnicas, unidas a la radiografía, la reflectografía infrarroja y la fotografía ultravioleta, proporciona información sobre las especiales características de la tecnología empleada para la creación de la obra, sin olvidar la caracterización del estado actual y las alteraciones producidas, un aspecto de una importancia vital a la hora de afrontar un plan de conservación, y una intervención.

Estas funciones quedan muy bien ilustradas con uno de los proyectos de investigación desarrollados en el IPCE dentro del Plan Nacional de Investigación en Conservación: se trata del proyecto *Estudio de la tecnología de las rejas españolas renacentistas* (PNIC2011/05), que liderado por Paz Ruiz (IPCE) ahonda en el estudio de algunas de las rejas más emblemáticas del arte español desde una perspectiva técnica, a diferencia de los estudios estilísticos tradicionales. La sistematización de estudios en los que la información obtenida de las fuentes documentales se coteja con la información obtenida de los análisis científico-técnicos¹, no es habitual en este tipo de bienes culturales, por lo que dada la novedad de este enfoque integral en el que participan centros y profesionales de diversas disciplinas (IPCE, Universidad Pablo Olavide, SGS Tecnos, S. A.), el gran formato de la mayoría de ellas y la complejidad en el sistema

de construcción, muy poco investigado hasta el momento, este proyecto está aportando resultados novedosos y necesarios para conocer la historia, desde el punto de vista técnico, de la rejería en España. Hasta la fecha, las rejas objeto de este estudio técnico proceden de la catedral de Granada, de la catedral de Sigüenza (Guadalajara) (figura 1), de la catedral de Sevilla y de la catedral de Santo Domingo de la Calzada (La Rioja).



Figura 1. Mosaico de imágenes que ilustra los diferentes estudios que se han realizado en la Reja de la capilla de las Reliquias o del Espíritu Santo (Sigüenza).

¹ Para el estudio integral de las rejas se ha contado con análisis de identificación de los materiales y los productos de alteración con distintos equipos de microscopía, técnicas cromatográficas, estudios de metalografía, y examen mediante imagen mediante técnicas de endoscopia, radiografía, gammagrafía y fotogrametría.

Desarrollo de nuevos materiales y técnicas

El mundo de la investigación en conservación del patrimonio se nutre del avance de la ciencia y el desarrollo tecnológico, que contribuye con nuevos materiales que ofrecen bien nuevas aplicaciones o bien buscan mejorar el comportamiento de otros sistemas anteriores. Así, se desarrollan consolidantes más efectivos o más específicos para un determinado soporte, con una mayor inocuidad. Otro ejemplo son los productos que diseñados para limpiezas específicas, con un rango de acción controlado, que no dejan restos ni interfieren en las zonas de la obra no tratada. Los nanomateriales que surgen del desarrollo tecnológico reciente son un buen ejemplo, consiguiendo preparar productos que en cierto modo son a medida en función de las propiedades requeridas. Otro ejemplo de estas funciones de la ciencia aplicada al patrimonio es el desarrollo de técnicas específicas que o bien trasladan a la conservación del patrimonio los últimos avances tecnológicos, o bien desarrollan prototipos para unas necesidades concretas de caracterización o medida.

Iniciativas como el sistema VARIM 2.0 (figura 2), dirigido por Tomás Antelo Sánchez (IPCE) y José Manuel Menéndez García (UPM), materializan estos objetivos. El proyecto desarrollado en el Instituto del Patrimonio Cultural de España junto con la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación y la empresa VISIONA IP, mejora las prestaciones de la anterior versión de captación de imágenes reflectográficas facilitando realizar tomas de banda ancha y estrecha de las obras de arte de forma más rápida y automatizada adaptándose de este modo a diferentes dimensiones (desde una pequeña tabla hasta un retablo con alturas que muchas veces superan los 5 m). Esta segunda versión incorpora las técnicas denominadas



Figura 2. Imagen del sistema VARIM 2.0 durante la captación de imágenes reflectográficas en el retablo de *Don Álvaro de Luna* (catedral de Toledo).

imagen multiespectral (MI) e imagen hiperespectral (HI), de manera que la ventana espectral abarcada va desde 1000 nm a 1700 nm. Los resultados obtenidos han aportado datos de relevancia, además de la tradicional observación del dibujo subyacente y cambios de composición tanto en la pintura como en el dibujo. Permite, cuando las condiciones son óptimas, la identificación de los pigmentos mayoritarios, la discriminación de materiales y capas ocultas de pintura, resultados que se corresponden con los obtenidos con otras técnicas analíticas y facilitan y orientan la selección de áreas de toma de muestra, todos ellos aspectos fundamentales en la conservación y restauración del patrimonio artístico.

Minimizar el deterioro

Tanto el punto de partida como el fin último de cualquier proceso de conservación están relacionados con la búsqueda de una minimización del deterioro. El desarrollo de tecnologías que posibilitan una mejor diagnosis de los agentes responsables de este deterioro, así como de aquellas que persiguen detener sus efectos, es clave a la hora de establecer planes o estrategias de preservación del patrimonio. Este es el objeto del proyecto *Desarrollo de tecnologías para la detección precoz de contaminantes biológicos en atmósferas de aire y anoxia. Aplicación a bienes culturales en vitrinas y contenedores para su almacenaje* que, bajo las directrices de Nieves Valentín (IPCE), combina estrategias como el empleo de extractos naturales y anoxia para minimizar y detener el biodeterioro como alternativa al uso de insecticidas y microbicidas que presentan riesgo para la salud y el medio ambiente en la conservación de bienes culturales de naturaleza orgánica. Entre las plantas investigadas, la *Artemisia absenta*, aplicada como extracto en disolución hidroalcohólica con un gas inerte como el nitrógeno de alta pureza, ha presentado una alta efectividad para eliminar hongos y bacterias ambientales, como *Penicillium chrysogenum* y *Bacillus subtilis*, en soportes de papel y pergamino utilizados como modelo de trabajo. Estas aplicaciones combinan el tratamiento de anoxia para desinsectación de bienes culturales con el procedimiento de desinfección (figura 3).



Figura 3. Preparación de la burbuja en la que se va a llevar a cabo el tratamiento de anoxia de una momia egipcia.

Desarrollo de protocolos

Por último, otra línea de investigación con gran interés por su aplicabilidad es la de desarrollar protocolos de conservación que establezcan metodologías útiles para el colectivo de restauradores y conservadores, con una perspectiva global de la intervención. Se abordan estudios previos para, por ejemplo, determinar el tratamiento o los productos a seguir durante la intervención; o bien ensayos de envejecimiento que proporcionen una perspectiva del comportamiento a largo plazo de los materiales, ya sea bajo condiciones críticas de humedad y temperatura, o de radiación, gracias a sendas cámaras de envejecimiento. También son relevantes los estudios de seguimiento que verifiquen la adecuación de las decisiones tomadas o bien el alcance deseado del proceso. Así es como se puede conseguir una unificación de criterios que sean aplicables en casos futuros de una manera más directa, y construir en definitiva herramientas sólidas de trabajo. Actualmente en el IPCE se está trabajando en diferentes proyectos en esta línea, como lo son el proyecto *Protocolo de evaluación del riesgo para la intervención en conjuntos escultóricos de piedra policromada (PNIC2015/05)* o *Desarrollo sostenible, oportunidades de investigación e innovación en conservación y restauración en patrimonio metálico subacuático. El conjunto numismático recuperado de la fragata Nuestra Señora de las Mercedes (PNIC2015/04)*.

El primero de ellos, coordinado por Ana Laborde Marqueze (IPCE), y en el que participan el IPCE, DACITEC, ARTE-LAB, la Fundación Andrew W. Mellon, la Facultad de Físicas (UCM) y el IVC+R, pretende establecer un protocolo de evaluación del riesgo para las intervenciones en piedra policromada que permita controlar la eficacia e inocuidad de los distintos sistemas propuestos de forma previa y durante todo el proceso de restauración: limpieza, desbiotización, fijación y consolidación.

La puesta a punto de este protocolo supondrá la validación de un sistema que valore de forma eficaz la incidencia de los tratamientos aplicados tanto de forma previa como a lo largo del proceso de intervención. Este aspecto es de gran importancia debido a la heterogeneidad en la composición y estado de conservación que habitualmente presentan los materiales pétreos policromados y a que las situaciones no permanecen constantes a lo largo de las actuaciones, pudiendo ajustarse los tratamientos según las situaciones de cada momento. Asimismo, la posibilidad de convertirlo en una norma nacional y en un estándar europeo garantiza el impacto y utilidad del proyecto en el ámbito de la conservación de los bienes culturales (figura 4).

El segundo proyecto, anteriormente citado, liderado por Soledad Díaz (IPCE), cuenta con la participación del IPCE, el CSIC-CENIM, el Museo Nacional de Arqueología Subacuática (ARQUA) y la Universidad Politécnica de Cartagena, busca la mejora en la conservación de materiales metálicos de procedencia subacuática, en concreto piezas numismáticas. Los estudios que se están llevando a cabo evalúan la efectividad de los tratamientos de limpieza (proyección de microabrasivos, plasma de hidrógeno, etc.), la efectividad de inhibidores de corrosión específicos para plata, los materiales de embalaje, almacenamiento y exposición, y la influencia del entorno ambiental en los procesos de degradación.

Como se puede entender a partir de los objetivos señalados, el abanico de técnicas y disciplinas con posible aplicación en la investigación en conservación es inmenso. Será el conocimiento presente y las necesidades de la obra en sí los que marquen las prioridades y el plan de trabajo. Se deben dejar a un lado antiguas discrepancias entre diferentes especialistas para afrontar las problemáticas de conservación de manera abierta, fomentando que las aportaciones más humanísticas y las más científico-experimentales se combinen buscando la excelencia en el trabajo realizado y la resolución real de las casuísticas que afectan a la conservación del patrimonio. Si bien es un término muy explotado ya, la interdisciplinariedad se



Figura 4. Observación con microscopio estereoscópico de las distintas capas de policromía para establecer la correspondencia de los estratos históricos (izquierda) y posterior toma de muestra empleando unas gafas de aumento (derecha) en el *Pórtico de la Gloria* (catedral de Santiago de Compostela).

presenta como una herramienta fundamental en este campo tan específico. Es desde esta perspectiva como se obtienen los mejores resultados al trasladar las aportaciones de la ciencia a los proyectos de conservación para así favorecer el acceso al patrimonio, con una mejora en la interpretación y la gestión del mismo, unos proyectos museográficos más completos y, en definitiva, lo que ya se comenta más arriba, que es la razón última: una puesta en valor de los bienes culturales y una mejora en la identificación que de ellos hace la sociedad.

La realidad del colectivo investigador

A la hora de plasmar en el trabajo diario los aspectos ya comentados, existe un colectivo repartido entre laboratorios de museos, de centros de conservación y restauración, en universidades y otras entidades gestoras del patrimonio que, superando muchas dificultades, consigue alcanzar los objetivos esperados para la investigación en conservación. Sin embargo, y pese a los casi dos siglos de historia de esta disciplina, todavía no se ha alcanzado el engranaje necesario que exige el desarrollo de esta ciencia.

Por un lado, la singularidad ya comentada afecta muy directamente a la hora de conseguir fondos y apoyos académicos e institucionales para los proyectos de investigación en conservación del patrimonio, al no existir convocatorias específicas en los planes estatales I+D+i

para este campo que no responde a un carácter puramente humanístico ni puramente experimental. Paralelamente, en muchas ocasiones las instituciones gestoras del patrimonio no tienen desarrolladas las vías para implantar programas y ayudas específicas, que permitan asemejar estrategias con las ya arraigadas en el mundo de la investigación universitaria, por ejemplo. Así, pese a que la entidad legal lo admita, podemos encontrarnos con dificultades internas a la hora de presentarse a una convocatoria competitiva o incluso a la hora de implementar una ayuda concedida. Esto es fruto de esa escisión, de esa dualidad en lo que comúnmente se llaman «Ciencias» y «Humanidades».

Esta circunstancia queda también reflejada en los programas formativos. Difícilmente se podrá reparar esta situación si desde la base no se busca la confluencia de estos dos mundos que, como ya se ha dicho, es una confluencia que existe, unida a la realidad del bien cultural. Actualmente algunas universidades españolas ofrecen enseñanzas de máster orientadas en esta línea. Son iniciativas muy interesantes, pero se trata de enseñanzas de nivel superior, sin afrontar la situación desde el inicio de la formación, lo que exige posteriormente, a la hora de la práctica profesional, un sobreesfuerzo y unas necesidades de ampliar conocimientos. No son pocos en este sector los científicos, químicos en especial, que además se han formado como restauradores, del mismo modo que no son pocos los restauradores que lideran investigaciones centradas en el mundo científico-experimental, pero en cualquier caso se trata de un colectivo pequeño, como decíamos con escasa oferta formativa y, por tanto, escasa oferta profesional.

Por otro lado, este personal cualificado se encuentra habitualmente ligado a instituciones en las que debe asumir un muy elevado volumen de trabajo de oficio, realizando los análisis asociados a intervenciones, a estudios de piezas, etc. El reconocimiento de las tareas de investigación en sus funciones se queda muchas veces en un texto sin que llegue a traducirse en horas de trabajo ni el reconocimiento profundo desde la institución para la que trabajan. Materializar la investigación acarrea un esfuerzo añadido, intelectualmente y con muchas horas extra dedicadas.

Finalmente, por los mecanismos ya establecidos de funcionamiento de muchos de los centros en los que se realiza esta investigación en conservación, las publicaciones, los congresos y otras actividades de intercambio de conocimiento no se producen en los mismos medios y foros que los que corresponden al colectivo más puramente científico experimental. Si unimos esto a la realidad de las titulaciones, es evidente que determinadas iniciativas promotoras de la investigación en la práctica resultan difícilmente alcanzables y resolutivas para esta otra realidad.

El Plan Nacional de Investigación en Conservación

En este sentido, es tarea fundamental de la administración pública impulsar la innovación y el desarrollo de los proyectos que responden a estas necesidades reales de la investigación en conservación del patrimonio, tanto financieramente como en cuanto al intercambio de conocimiento y establecimiento de una red sólida de profesionales.

A la vista de las necesidades y peculiaridades de esta disciplina híbrida, nace en julio de 2011 el Plan Nacional de Investigación en Conservación del Patrimonio Cultural (PNIC) como herramienta fundamental para promover la investigación en materia de conservación del patrimonio cultural, una investigación que cada vez es más exigente a medida que se incrementa el valor que la sociedad otorga a su patrimonio, que está obligada a evolucionar por enfrentarse permanentemente a nuevos retos y que tiene un carácter multidisciplinar que exige el desarrollo de una metodología mixta específica (figura 5).



Figura 5. Portada de la publicación del *Plan Nacional de Investigación en Conservación del Patrimonio Cultural*.

El Plan Nacional se constituye como eficaz instrumento de gestión. Incide, por tanto, en la necesidad de abordar las intervenciones sobre los bienes culturales con un enfoque amplio que contemple todos los aspectos y valores que engloba el concepto de patrimonio cultural y el papel que éste juega en la sociedad actual: la interdisciplinaridad, la investigación y la aplicación del método científico con el objetivo de fomentar el conocimiento de los bienes culturales, aplicar intervenciones de conservación, y desarrollar acciones de difusión, con el fin de protegerlo, promover el acceso de los ciudadanos al mismo y favorecer su contribución al desarrollo social y económico.

Con esta visión y buscando una serie de herramientas que facilite en un plano más concreto la coordinación de actuaciones entre los diferentes actores, el PNIC establece por un lado cinco programas para los proyectos de investigación e innovación tecnológica que se desarrollan en este marco, entendiendo que dentro de cualquier investigación la herramienta fundamental para fomentar el avance de la cien-

cia son los proyectos de investigación. Estos programas aparecen recogidos y bien definidos en el texto del Plan, accesible a través de la dirección web <http://www.mecd.gob.es/planes-nacionales/planes-nacionales.html>.

Asimismo, y con el objetivo puesto en el lanzamiento de una convocatoria competitiva específica que financie estos proyectos, se buscan otros medios impulsores de la citada coordinación y que tengan también un efecto aglutinador de una investigación que en muchas ocasiones se encuentra dispersa en diferentes convocatorias o, como se comentaba más arriba, se realiza dentro de las tareas habituales de algunos centros de conservación y otras instituciones culturales. Un ejemplo de esto son los trabajos actuales por el establecimiento de un «sello PNIC», que esperamos pronto vea la luz, y que, si bien no implica compromiso económico por parte de ninguna institución, sea un medio o una garantía de reconocimiento en cuanto a la adecuación de los proyectos a los criterios, metodologías y prioridades temáticas establecidas en el PNIC.

Otra herramienta fundamental y actualmente consolidada es el Observatorio para la Investigación en Conservación (www.investigacionenconservacion.es), un instrumento transversal de implementación del PNIC, que recopila información relativa a la investigación en conservación, en sus diferentes facetas, fomentando la cooperación y transferencia entre grupos de investigación, instituciones y profesionales del sector y apoyando la búsqueda de financiación de proyectos de investigación para asegurar el progreso del conocimiento en este campo.

Otras oportunidades: perspectiva europea

Además del PNIC y de los planes nacionales de I+D+i, existe otra alternativa para impulsar la investigación y lograr financiación para proyectos dirigidos a poner en valor el patrimonio cultural, a la par que se puede investigar en nuevas técnicas para mantenerlo, hacer uso del mismo y darle la máxima difusión. Se trata de los proyectos europeos, financiados por la Unión Europea desde el Primer Programa Marco, creado en 1984, y activo desde entonces. A la fecha de escritura de este texto, la UE tiene activo el equivalente al Octavo Programa Marco, denominado *Horizonte 2020 (H2020)*, que arrancó en 2014 y se extiende hasta 2020.

Los proyectos europeos son un mecanismo muy interesante, que favorece los siguientes aspectos:

1. Obtener financiación estable durante un periodo que oscila entre los dos y los tres años, en promedio, para actividades de I+D+i.
2. Entrar en contacto con otros investigadores del mismo campo o campos próximos, lo cual facilita el intercambio de conocimientos, opiniones y metodologías (desde el punto de vista técnico) con personas del mismo país o de otros países de la Unión Europea (o, incluso, de terceros países con acuerdo marco para poder participar en proyectos europeos, como Suiza, Israel, países de Iberoamérica, Turquía, etc.).
3. Facilitar la creación de redes internacionales temáticas, de entidades colaboradoras habituales de proyectos europeos, para la formación de consorcios en propuestas europeas, organización de congresos y *workshops*, edición y publicación de textos científicos con proyección internacional, etc.

Los proyectos europeos son, sin duda, uno de los mejores mecanismos para entrar en contacto con los investigadores más destacados desde un punto de vista científico y técnico, a nivel internacional.

El *Programa Horizonte 2020* concentra gran parte de sus actividades de investigación e innovación de Europa, en estos momentos. Está estructurado en tres pilares básicos, que permiten abordar los principales retos sociales, promover el liderazgo industrial en Europa y reforzar la excelencia de su base científica.

Horizonte 2020 incluye todas las fases del proceso de transferencia científica y tecnológica, desde la generación del conocimiento hasta las actividades más próximas al mercado: investigación básica, desarrollo de tecnologías, proyectos de demostración, líneas piloto de fabricación, innovación social, transferencia de tecnología, pruebas de concepto, normalización, apoyo a las compras públicas precomerciales, capital riesgo y sistema de garantías.

Los objetivos estratégicos del programa *Horizonte 2020* son los siguientes:

- a) Crear una ciencia de excelencia, que refuerce la posición de la UE en el panorama científico mundial. Para ello se incrementa considerablemente la dotación del Consejo Europeo de Investigación (European Research Council –ERC–), que subvenciona a investigadores europeos del más alto nivel sin que sea necesario el trabajo en consorcio internacional, y se amplía el campo de las tecnologías futuras cubriendo todos los sectores (Future and Emerging Technologies –FET–). En el ámbito de la movilidad de investigadores se mantienen las actividades del programa *Marie Curie* para apoyar la formación, la movilidad y la cualificación de investigadores y las infraestructuras de equipos de investigación.

- b) Desarrollar tecnologías y sus aplicaciones para mejorar la competitividad europea. Cuenta con importantes inversiones en tecnologías clave para la industria, como tecnologías de la información y comunicación (TIC), las nanotecnologías, fabricación avanzada, la biotecnología y el espacio. En este apartado es necesario destacar las actividades para pymes que pueden participar en los proyectos colaborativos de los retos sociales y de tecnologías.
- c) Investigar en las grandes cuestiones que afectan a los ciudadanos europeos. La atención se centra en seis áreas esenciales para una vida mejor: 1) salud; 2) alimentación y agricultura, incluyendo las ciencias del mar; 3) energía; 4) transporte, clima y materias primas; 5) sociedades inclusivas, y 6) seguridad. Los resultados se dirigen a resolver problemas concretos de los ciudadanos, como por ejemplo el envejecimiento de la sociedad, la concienciación de una cultura y un patrimonio común en Europa, la protección informática o la transición a una economía eficiente y baja en emisiones de carbono.

La participación en una propuesta del Programa Marco se basa en competir con los mejores, y en la mayoría de las ocasiones es necesario realizar actividades en consorcio (grupos de investigación, empresas y usuarios) con las excepciones del Consejo Europeo de Investigación (ERC) y algunas acciones de movilidad y pymes. La competencia es dura (la tasa de financiación de las actividades está alrededor del 20%), pero el esfuerzo se ve altamente recompensado cuando una buena propuesta es seleccionada para ser puesta en marcha.

Las propuestas deben ser preparadas en función de los bloques temáticos lanzados en las convocatorias anuales competitivas, gestionadas por la Comisión Europea, con unas prioridades preestablecidas en los programas de trabajo, que son públicos.

En particular, y en temas de patrimonio, dentro de los retos sociales se incluye el apartado de sociedades reflexivas, que pretende contribuir a la comprensión de la base intelectual de Europa: su historia y las diversas influencias europeas y extraeuropeas, como inspiración para nuestra vida actual. Europa se caracteriza por una variedad de pueblos, tradiciones e identidades regionales y nacionales diferentes, así como por niveles diferentes de desarrollo económico y social. Las migraciones y la movilidad, los medios de comunicación, la industria y el transporte contribuyen a la diversidad de opiniones y de estilos de vida que deberían reconocerse y tenerse en cuenta.

La UE considera que las colecciones europeas de las bibliotecas (incluidas las digitales), archivos, museos, galerías y otras instituciones públicas contienen un tesoro de documentación y objetos de estudio sin explotar en su máximo potencial. Estos recursos archivísticos, junto con el patrimonio intangible, representan la historia de cada Estado miembro pero al mismo tiempo la herencia colectiva de una Unión que ha ido creándose a lo largo del tiempo. Estos materiales deberían hacerse accesibles, incluso por medio de nuevas tecnologías, a los investigadores y a los ciudadanos, para que miren al futuro a través del archivo del pasado. La accesibilidad y la conservación de estas formas del patrimonio cultural son necesarias para contribuir al crecimiento económico sostenible.

En particular, este reto centra sus convocatorias (algunas ya publicadas y cerradas, y otras aún en vigor y abiertas a la recepción de propuestas de proyectos) en:

- a) El estudio del patrimonio, la memoria, la identidad, la integración y la interacción y traducción culturales de Europa (colecciones, archivos y museos culturales y científicos).
- b) La investigación de la historia, la literatura, el arte, la filosofía y las religiones de los países y regiones de Europa.

- c) La investigación del papel de Europa en el mundo, de la influencia mutua y de los vínculos entre las regiones del mundo, y de la visión de las culturas europeas desde el exterior.

Un aspecto importante a tener en cuenta es que, en este tipo de convocatorias, es muy extraño que se publique una que aborde, de manera directa, nuestro tema de investigación. Lo habitual es componer una propuesta a base de unir, desde el punto de vista industrial, diferentes actores de la cadena de valor, y desde el punto de vista científico y técnico, diferentes componentes que permitan abordar el proyecto en su globalidad. En particular, en temas de patrimonio se pueden integrar aspectos de restauración, mantenimiento, catalogación, archivo, exposición, etc.

En este espíritu europeo e integrador, en el momento actual se abren nuevas perspectivas con la implantación de una infraestructura paneuropea que ofrecerá a los investigadores el acceso a una red de centros singulares dedicados a la conservación científica poniendo a su disposición archivos, técnicas móviles, instalaciones fijas de gran escala así como la información digital generada y almacenada. Este acceso se implementa mediante una serie de plataformas: ARCHLAB (figura 6), MOLAB, FIXLAB y DIGILAB, formando una infraestructura que recibe el nombre de E-RIHS (*European Research Infrastructure for Heritage Science*) y que se convierte así en un apasionante proyecto que puede afectar directamente al fomento de esta ciencia que nos ocupa. Su funcionamiento estará basado en una red de nodos nacionales, y se basa en experiencias de proyectos anteriores bien conocidos como son IPERION, CHARISMA o Eu-ARTECH. Se está trabajando actualmente en el establecimiento de esta red que estará operativa en el año 2020.



Figura 6. Acceso a una de las fototecas históricas del IPCE en el marco del programa de acceso ARCHLAB dentro de la red IPERION CH. Fotografía: Carlos Teixidor.

Conclusiones

Son diferentes las oportunidades y desafíos que surgen a la hora de afrontar el trabajo investigador y la aplicación de las disciplinas de las ciencias naturales en la labor de conservación del patrimonio desde todas sus perspectivas, con un propósito firme de permitir y fomentar la transferencia a la sociedad tanto de un adecuado estado de conservación de los bienes culturales, como de los conocimientos adquiridos que podrán mejorar y ser útiles en futuros planteamientos. Se plantea necesario e imprescindible mejorar las políticas de funcionamiento de muchos de los centros en los que se realizan estas labores de investigación y muy especialmente de aquellos que no nacieron con una finalidad claramente investigadora, como son en su mayoría los centros de conservación y restauración y aquellos que custodian el patrimonio, pero que incluyen de manera natural las labores de investigación. Si bien se ha incorporado en muchos casos este reconocimiento a sus funciones, llegando incluso a existir una mención expresa en la Ley 14/2011, de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, como agentes de ejecución para muchos de estos centros, el engranaje de funcionamiento no responde hoy en día al de centros de investigación, siendo necesaria una adaptación posterior de políticas investigadoras a los trámites más puramente administrativos que restan agilidad y capacidad de trabajo.

No obstante, la tarea es apasionante y bien merece el dedicar esfuerzos a ello, para contribuir al desarrollo de esta ciencia y fomentar la integración de los diferentes conocimientos en favor de la conservación de los bienes culturales.

La participación en proyectos de investigación financiados por la Unión Europea supone un reto y una oportunidad: reto, porque implica acudir a convocatorias competitivas, donde el número y nivel de calidad de las entidades que compiten es elevado, y oportunidad, porque propicia el contacto directo con una red de investigadores dedicados a la conservación del patrimonio.

Bibliografía

- DEL EGIDO, M., y BUESO, M. (2013): «Herramientas de gestión del Patrimonio Cultural: el Plan Nacional de Investigación en Conservación». *Actas del VIII Congreso Internacional AR&PA: Innovación en el patrimonio*. Valladolid.
- DEL EGIDO, M.; JUANES, D., y BUESO, M. (2013): «Consideraciones en torno a los estudios científicos aplicados a la conservación del patrimonio cultural». *Ciencia y Arte IV. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid.
- Folleto del Plan Nacional del Investigación en Conservación. www.mecd.gob.es/planes-nacionales
- GILBERG, M. (1987): «Friedrich Rathgen: The father of modern archaeological conservation». *Journal of the American Institute for Conservation (JAIC)*, 26 (2): 105-120.
- GONZÁLEZ, E.; PEÑA, C., y SÁNCHEZ, E. (2013): «Nanomateriales para la conservación y preservación de obras mueble e inmueble. Posibles enfoques aplicados al patrimonio documental». En *Ciencia y Arte IV. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid.
- HERNÁNDEZ, J. C.; RUIZ, P.; ANTELO, T.; LAGUNA, J.; GÓMEZ, A.; GARCÍA, M. A., y PÉREZ, P. P. (2015): *La reja de la capilla de las Reliquias de la Catedral de Sigüenza. Estudios, análisis, restauración y mantenimiento de una obra renacentista*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte (España). https://sede.educacion.gob.es/publiventa/descarga.action?f_codigo_agc=14856C
- MORALES, R.; BLANCO, P.; LALANA, P.; PARDO, M., y VALENTÍN, N. (2013): «Extractos naturales para la desinfección y desinsectación de bienes culturales. Las plantas medicinales y el patrimonio histórico». *Ciencia y Arte IV. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid.

- Plan Nacional de Investigación en Conservación* (2016): Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2016. <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/plan-nacional-de-investigacion-en-conservacion-del-patrimonio-cultural/patrimonio-historico-artistico/20706C>
- Planes Nacionales de Patrimonio Cultural* (2016): Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. <https://sede.educacion.gob.es/publiventa/planes-nacionales-de-patrimonio-cultural/patrimonio-historico-artistico/20632C>
- VEGA, C.; GARCÍA, E.; ANTELO, T.; BUESO, M.; TORRES, J., y MENÉNDEZ, J. M. (2015): «VARIM 2.0. Imagen multiespectral e hiperespectral en el infrarrojo». *Ciencia y Arte V. Ciencias y tecnologías aplicadas a la conservación del patrimonio*. Madrid.
- VEGA, C., TORRES, J., ANTELO, T., DEL EGIDO, M., MENÉNDEZ, J. M., y BUESO, M. (2013): «VARIM 2.0: Non invasive NIR hyperspectral imaging for analysis of cultural beings». *Proceedings International Congress on Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage*, 2-5 October, 2012 Santiago de Compostela, Spain, pp 155-159. Editorial (si libro): CRC Press. Taylor & Francis Group. London, UK.

Enlaces de interés

www.mecd.gob.es/planes-nacionales/textos-planes-nacionales.html
www.mecd.gob.es/planes-nacionales/planes/investigacion-conservacion.html
www.investigacionenconservacion.es
www.iperionch.eu
www.eshorizonte2020.es
www.e-rihs.eu/

TÉCNICAS DE ANÁLISIS APLICADAS A BIENES CULTURALES

La espectroscopia Raman portátil, una herramienta de diagnóstico en Patrimonio imprescindible en el futuro

Juan Manuel Madariaga

Departamento de Química Analítica, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Aptdo. 644, 48080 Bilbao
juanmanuel.madariaga@ehu.eus

Resumen: La espectroscopia Raman portátil es una técnica de análisis no destructivo que se utiliza para caracterizar los compuestos originales presentes en los materiales de Patrimonio Cultural (pigmentos, aglutinantes, etc.), así como los productos de deterioro que están presentes en muchos de ellos. El uso de la espectroscopia Raman portátil permite un análisis directo, sin toma ni tratamiento de muestra, lo que es de vital importancia para ser aplicables a elementos tan sensibles e irremplazables como son los del Patrimonio Cultural. La espectroscopia Raman portátil puede ser complementada con otras técnicas portátiles de análisis no destructivo para la determinación elemental (XRF, Espectrometría de Fluorescencia de Rayos-X y/o LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy) y/o para la caracterización molecular (Espectroscopia Infrarroja, especialmente en modo DRIFT). Todos estos instrumentos portátiles de alta sensibilidad permiten hacer análisis *in situ* incluso a escala microscópica, reduciendo las necesidades de tomar muestras, aunque sea en la escala milimétrica.

Palabras clave: Espectroscopia Raman, instrumento portátil, caracterización, compuestos originales, productos de deterioro.

Abstract: Portable Raman spectroscopy is a non-destructive analytical technique used to characterize the original compounds present in the materials of Cultural Heritage (pigments, binders, etc.) as well as the decaying products that are present in most of them. The use of portable Raman spectroscopy allows performing a direct analysis, without sampling nor sample treatment, which is a key issue for the sensitive and irreplaceable artifacts of Cultural heritage. Portable Raman spectroscopy can be complemented with other portable non-destructive analytical techniques to ascertain the elemental (XRF, X-Ray Fluorescence and/or LIBS, Laser Induced Breakdown Spectroscopy) and/or molecular (Infrared spectroscopy, especially in DRIFT mode) composition. All these high sensitive portable instruments allow performing the *in situ* analysis even at microscopic scale, reducing the need to take samples, even at the millimetric scale.

Keywords: Raman spectroscopy, portable instrument, characterization, original compounds, decaying products.

Introducción

Las estrategias en conservación del Patrimonio Cultural se desarrollan hoy en día como resultado de un trabajo conjunto entre profesionales de distintas áreas. Los conservadores tienen una amplia perspectiva sobre la naturaleza de los materiales usados en la ejecución de las obras de arte, ya que poseen buenas habilidades y conocimientos adquiridos con su dilatada experiencia sobre materiales y el periodo en el que fueron usados. Todas las observaciones realizadas por los restauradores deben ser corroboradas por el análisis científico de dichas obras, ya que en el pasado se han encontrado contradicciones importantes (Pérez-Alonso *et al.*, 2004: 379-389). Los científicos pueden estudiar los materiales y el modo en que estos envejecen en un determinado medio ambiente.

El campo de las Ciencias del Patrimonio Cultural es amplio y complejo, necesitando los aportes de la químico-física, la química analítica, la biología, la ingeniería, las ciencias de los materiales, etc. Afortunadamente, la química analítica es una de esas ciencias que está teniendo un papel más importante en los últimos años, especialmente con la llegada de la instrumentación portátil. Incluso se puede hacer el análisis a escala microscópica usando trípodes motorizados en los ejes X-Y-Z, lo que permite no solo acceder a granos individuales en las superficies, sino a granos del interior a través del análisis en las grietas o desprendimientos. En una reciente revisión este autor presentó los últimos avances de la química analítica aplicada a Patrimonio Cultural (Madariaga, 2015: 4848-4876).

La espectroscopia Raman

Cuando se iniciaron los trabajos científicos en Patrimonio la técnica espectroscópica más usada fue la espectroscopia infrarroja. Los trabajos desarrollados con esta técnica en la segunda mitad del siglo xx se recogieron en una exhaustiva revisión (Casadio y Toniolo, 2001: 71-78). Pero con la llegada de los láseres modernos, la espectroscopia Raman empezó a tomar un protagonismo superior. Los primeros trabajos que usaron espectroscopia Raman en Patrimonio Cultural datan de 1984 en Francia, el primero mostrando las posibilidades de la microsonda Raman en la identificación de malaquita y azurita (Guineau, 1984: 35-41) y el segundo con la misma técnica microanalítica para estudiar manuscritos iluminados y materiales arqueológicos (Guineau, 1984: 471-485).

Al inicio de la década de los noventa empezaron a publicar sus resultados varios grupos de investigación europeos. La primera revisión de lo realizado hasta 1995 sobre el análisis de manuscritos iluminados puso de manifiesto las grandes ventajas de la espectroscopia Raman sobre otras técnicas analíticas (Clark, 1995: 187-196). La mayoría de los nuevos desarrollos realizados en el siglo xxi fueron presentados como comunicaciones a la serie de congresos titulados «International Congress on the Application of Raman Spectroscopy in Art and Archaeology (RAA)», eventos con una larga tradición que se iniciaron en Londres (RAA2001) y han continuado en Gante (RAA2003), París (RAA2005), Módena (RAA2007), Bilbao (RAA2009), Parma (RAA2011), Liubliana (RAA2013) y Wroclaw (RAA2015). Los trabajos más destacados se han recogido en distintos números especiales de la revista *Journal of Raman Spectroscopy*; en el último publicado (Łydźba-Kopczyńska y Madariaga, 2016: 1004-1007) se puede acceder al conjunto de la bibliografía más relevante de los últimos quince años sobre el uso de la espectroscopia Raman en Patrimonio Cultural.

La espectroscopia Raman portátil

A partir del inicio de siglo se realizaron muchos de los avances en el desarrollo y uso de instrumentación Raman portátil para trabajos de campo. Es de destacar el trabajo pionero del profesor Rull, que fue el primero en sacar del laboratorio un sistema portable para analizar el Beato de Valcavado depositado en la Biblioteca Antigua de la Universidad de Valladolid, y cuyos resultados se presentaron en el RAA2001 y luego se publicaron en el libro dedicado al Congreso (Rull, Sansano y Medina, 2005, 212-219).

También se produjeron avances en el desarrollo de instrumentos portátiles de otro tipo de técnicas espectroscópicas, técnicas que en los trabajos de laboratorio siempre aparecen como complementarias a la espectroscopia Raman, como son la fluorescencia de rayos-X (XRF), la espectroscopia LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), la espectroscopia infrarroja en sus modos de reflectancia por fibra óptica (FORS) o de reflectancia difusa infrarroja en transformada de Fourier (DRIFT) e incluso la difracción de Rayos-X (XRD), siempre con el propósito de diagnosticar el estado de conservación de elementos del Patrimonio Cultural (Madariaga, 2015: 4848-4876).

De toda esta instrumentación comercial, los diferentes tipos de espectrómetros Raman portátiles son actualmente los que ofrecen una mayor versatilidad (distintos tamaños, distintas potencias de los láseres de excitación, distintas longitudes de onda en los láseres de excitación, distintas sensibilidades en los detectores, etc.). Consecuentemente, el número de artículos científicos que se publican usando espectroscopia Raman portátil se está incrementando año tras año.

La espectroscopia Raman portátil presenta muchas ventajas. Por ejemplo, en un día de trabajo en campo se pueden obtener unos 200 espectros válidos, lo que equivale a realizar el análisis de composición molecular de 200 muestras. Imaginemos el ahorro que tenemos al evitarnos tomar 200 muestras, llevarlas al laboratorio y realizar el análisis. Pero también tiene sus desventajas, como son los fallos de enfoque debido a vibraciones (viento, tráfico, etc.) y la interferencia de la luz solar.

No siempre es posible evitar la presencia de la luz solar en el camino óptico entre la muestra y el sensor Raman. En una campaña de análisis que realizó nuestro grupo de investigación sobre esculturas de acero CorTen en distintas zonas de Bilbao (Aramendia *et al.*, 2011: 1111-1117), en el marco de un proyecto de investigación con el Departamento de Restauración del Museo Guggenheim de Bilbao, nos encontramos con este problema. La figura 1 muestra detalles de los análisis realizados en el ambiente externo propio de la atmósfera de Bilbao.

Sistemáticamente se obtuvieron unos espectros Raman muy complejos. La figura 2a muestra un espectro tomado sobre una zona amarillenta (degradada, por tanto) de dicho acero usando un espectrómetro Raman con un láser de excitación a 785 nm de longitud de onda. Resolver qué fases minerales de hierro estaban presentes fue fácil, ya que aparecieron varias de las bandas Raman características de dos de ellos (véase figura 2b), la goetita, que es la forma α -FeO(OH), y la lepidocrocita, que es la forma γ -FeO(OH) del oxihidróxido de hierro(III). Fue más complicado resolver las bandas minoritarias, sugiriendo incluso la presencia de coquimbite, un sulfato de hierro ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) producto típico de degradación en atmósferas cargadas en óxidos de azufre, pero su identificación fue cuestionada al no detectarse las bandas secundarias de dicho compuesto, tal como se observa en la figura 2c. La explicación de las bandas no identificadas de la figura 2b se pudo realizar tras obtener el espectro de la luz solar y compararlo con el espectro tomado sobre la muestra. Como se observa en la figura 2d, hay incluso seis bandas de la luz solar en el espectro experimental de la muestra, quedando



Figura 1. Detalles de análisis Raman portátil sobre superficie de esculturas en acero CorTen expuestas al aire libre en Bilbao, realizados por las investigadoras Julene Aramendia y Leticia Gómez-Nubla.

todas las señales perfectamente caracterizadas. A partir de entonces, casi siempre fue necesario caracterizar el espectro de la luz solar para restar su influencia en los espectros que se tomaron sobre las superficies de los aceros CorTen.

Si estos inconvenientes que aparecen en la operativa del trabajo en campo se solucionan, la información que se puede obtener con la espectroscopia Raman portátil es de importancia vital a la hora de caracterizar sistemas complejos. La figura 3 muestra una de esas situaciones. En varios trabajos realizados en colaboración con el grupo del profesor Hernanz (Universidad Nacional de Educación a Distancia) para el estudio de pictogramas y motivos de arte parietal en los Abrigos del Mediterráneo (Patrimonio de la Humanidad) se utilizó la espectroscopia Raman portátil para obtener la información básica necesaria para, entre otras cosas, decidir si era necesario hacer o no un proceso de toma de muestra.

En el caso presente (Pitarch *et al.*, 2014: 6641-6650), la información Raman confirmó el pigmento (hematita) usado para realizar la figura, pero aportó más información relativa al sustrato (calcofanita) y a la presencia de dos compuestos clave para la conservación de las pinturas, el yeso y la whewellita ($\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), tal como propuso el profesor Hernanz en un trabajo previo donde también se usó espectroscopia Raman, pero en el laboratorio sobre láminas delgadas preparadas a partir de micromuestras tomadas en los Abrigos (Hernanz *et al.*, 2010: 1394-1399).

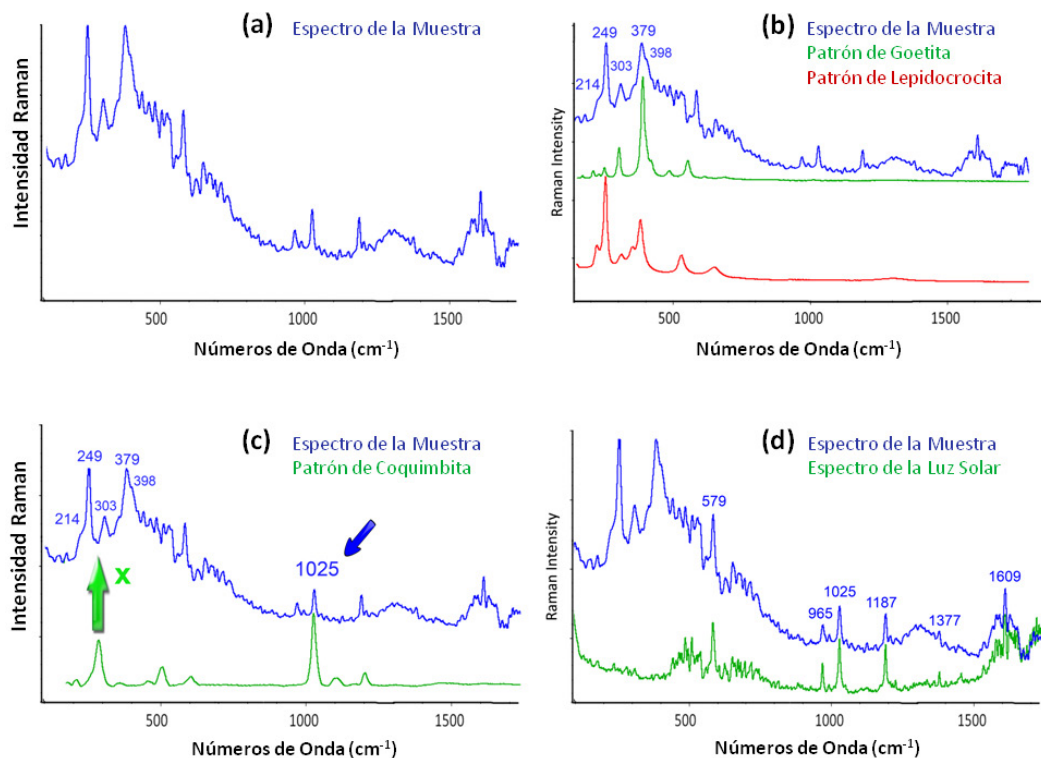


Figura 2. Proceso de interpretación de un espectro Raman: a) espectro obtenido sobre una zona amarilla de la figura 1; b) identificación de goetita y lepidocrocita; c) ¿tenemos coquimbita en el espectro?; d) no, tenemos hasta seis bandas Raman provocadas por la luz solar.

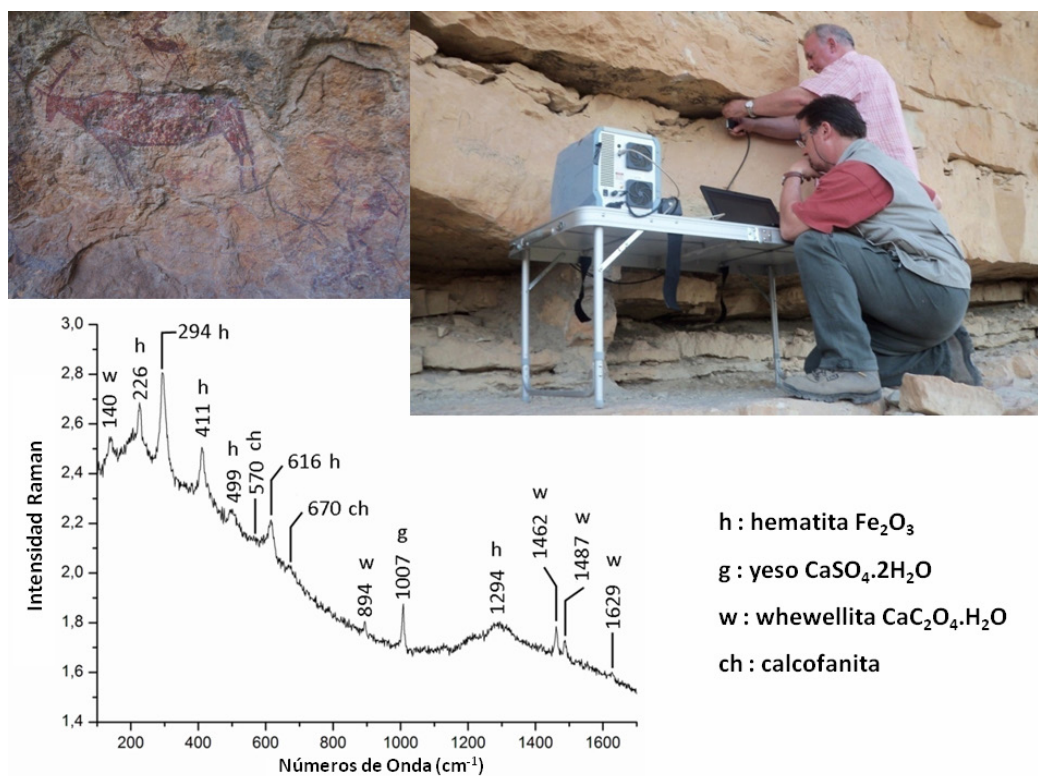


Figura 3. El autor con el profesor Hernanz midiendo pinturas rupestres en uno de los abrigos pertenecientes a los sitios de arte levantino (Patrimonio de la Humanidad). Detalle del espectro Raman obtenido donde aparece información de cuatro compuestos distintos.

Espectroscopia Raman *in situ* e impactos ambientales

En los estudios científicos sobre elementos de Patrimonio Cultural casi siempre aparecen compuestos químicos esperables (son los que forman parte de los materiales originales con los que se ha hecho la obra) y otros compuestos no esperados. Estos compuestos no esperados pueden ser fruto de *a)* la llegada de materiales desde el exterior hasta la superficie de los objetos donde se quedan retenidos y/o *b)* la reacción química entre compuestos originales y compuestos (partículas sólidas, aerosoles/agua con iones disueltos o compuestos gaseosos) que llegan al objeto desde la atmósfera circundante. Ese conjunto de formas químicas no esperadas son el producto de lo que denominamos como impactos ambientales.

Son muchos los trabajos que ha desarrollado no solo nuestro grupo de investigación, sino también otros grupos internacionales donde se describen distintas casuísticas, muchas de las cuales están recogidas en la revisión citada anteriormente (Madariaga, 2015: 4848-4876). Ahora vamos a centrarnos en una problemática escasamente abordada en el campo de la restauración de objetos arqueológicos.

A diferencia de otras manifestaciones de Patrimonio Cultural, los objetos arqueológicos tienen una problemática especial. Durante años (cientos o miles) los objetos han permanecido en un ambiente particular de enterramiento, con unas condiciones químicas dadas que condicionan el equilibrio químico particular del objeto arqueológico y, en consecuencia, su particular estado de conservación. En el momento de ser excavados, esos objetos cambian drásticamente de ambiente y comienza a producirse un conjunto de reacciones que van a condicionar su nuevo estado de conservación. Estado que va a ser distinto al anterior dentro del enterramiento.

El análisis *in situ* de los objetos y de los sedimentos de la excavación permite hacer un diagnóstico inicial de gran valor para tomar decisiones sobre cómo manipular el objeto y cómo aplicar el método adecuado para su conservación. Pongamos un ejemplo para ilustrar la importancia de la propuesta que realizamos.

En la excavación del sitio arqueológico del Castillo de Ereñozar (Ereño, Bizkaia) apareció a pocos centímetros de la superficie del suelo (entre 40 y 80 cm) una necrópolis datada en el siglo XIII, con cerca de setenta enterramientos, donde aparecieron entre otros objetos metálicos unas espuelas de alto valor a la vista de lo que se veía bajo la costra de óxidos de hierro (véanse detalles brillantes en la figura 4).

El análisis Raman reveló la presencia de un compuesto esperado, la lepidocrocita ($\gamma\text{-FeO(OH)}$), un oxihidróxido de hierro (III) de naturaleza inestable hasta que transita a goetita, $\alpha\text{-FeO(OH)}$, la forma estable del oxihidróxido de hierro) típico de objetos metálicos que están sufriendo un



Figura 4. Espuela corroída excavada en el yacimiento de Ereñozar (siglo XIII). Obsérvense los puntos brillantes en las zonas con menos capa de corrosión.

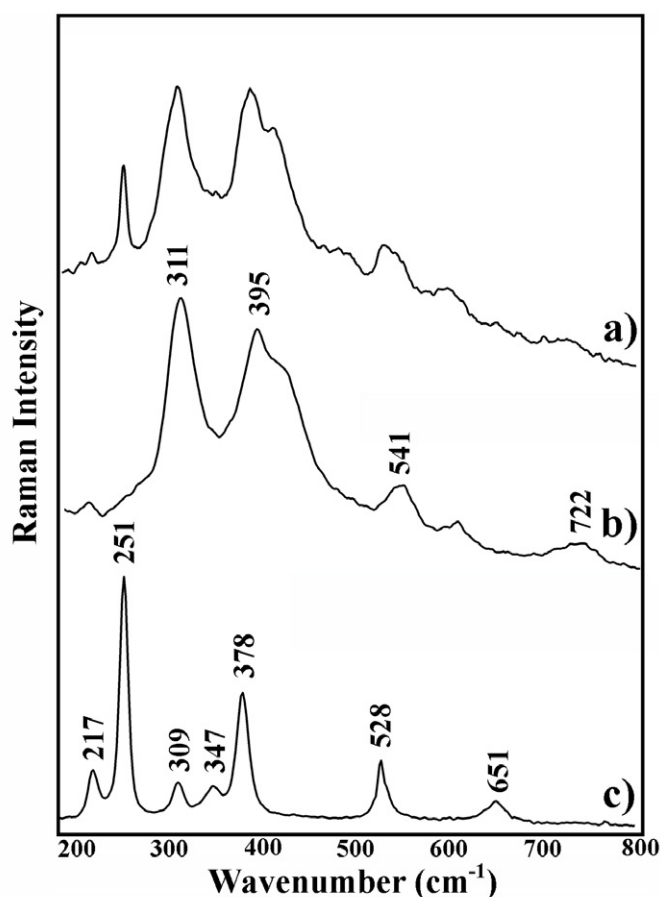


Figura 5. a) Espectro Raman obtenido sobre la espuela de la figura 4. b) Espectro Raman de un patrón de akaganita. c) Espectro Raman de un patrón de lepidocrocita.

proceso de transformación al ser sacados del entorno de enterramiento y ser puestos en contacto con la atmósfera oxidante. La figura 5a muestra el espectro Raman tomado de la muestra mientras que la figura 5c presenta el espectro Raman patrón de la lepidocrocita; como se observa, las bandas Raman más intensas de la lepidocrocita están presentes en la respuesta de la muestra, pero existen otras bandas cuyo perfil se corresponde con la akaganita ($\text{FeO}_{0,883}(\text{OH})_{1,167}\text{Cl}_{0,167}$, otro oxihidróxido de hierro que contiene cloruro en su estructura), tal como se aprecia al comparar las señales con las del espectro patrón mostrado en la figura 5b.

La akaganita fue un compuesto no esperado ya que se forma donde existen cloruros. En un enterramiento los cloruros no son formas químicas importantes ya que no forman parte de los compuestos de los suelos y sedimentos. Para conocer la fuente de dichos cloruros, se tomaron muestras de los estratos de sedimentación y se les realizó un test de sales solubles (Veneranda *et al.*, 2017: 258-266) obteniéndose una elevada concentración de cloruros disponibles en los sedimentos, llegándose a concentra-

ciones del 3,2 % (3,2 g de cloruro extraíbles por 100 g de suelo). Es decir, los cloruros no están fijados al suelo, sino que son transportables por el agua que percola (filtra de arriba abajo) a través de los sedimentos del enterramiento y puede llegar a la pieza metálica, provocando la formación de akaganita. Esto nos indicó que estábamos ante un claro ejemplo de impacto de aerosol marino. El sitio arqueológico está a 400 metros sobre el nivel del mar pero a corta distancia (un par de kilómetros) de la línea de costa y recibe un aporte continuo de cloruros tanto por deposición seca (aerosol) como por deposición húmeda (lluvia).

Tanto la lepidocrocita como la akaganita son fases reactivas que deben ser considerados como aceleradores de los procesos de degradación de piezas de hierro. La akaganita es la más peligrosa de los dos debido a la presencia de iones cloruro en su estructura, lo que incrementa la porosidad de la capas de corrosión, facilitando la aparición de grietas e hinchamientos. Los restauradores de piezas metálicas saben bien lo difícil que es eliminar los cloruros, pero si se actúa al poco tiempo de haberse excavado, las posibilidad de hacerlo con éxito aumenta. Y esto es lo que se consiguió al haber podido hacer el análisis antes de definir el protocolo de limpieza-conservación-restauración. El resultado final se aprecia en la figura 6 donde se observa cómo el objeto era una espuela dorada que se manufacturó con la técnica de al fuego. Los detalles se recogen en una reciente publicación (Veneranda *et al.*, 2016: 20160046).



Figura 6. Espuela tras el proceso de limpieza y restauración.

Microscopia Raman *in situ*

Uno de los problemas típicos cuando se utiliza espectroscopia Raman portátil usando sondas convencionales (superficie de análisis de hasta 200 micras) es la aparición de fenómenos de fluorescencia debidos a las características de las superficies a analizar. Una de las causas que provoca fenómenos de fluorescencia es la presencia de silicatos (piedras areniscas, ladrillos, arcillas, etc.) en la superficie de análisis. Otra de las causas es la presencia de polímeros orgánicos (naturales como las ceras y resinas o sintéticos como el Paraloid B72 y similares) sobre las capas de pigmentación.

Este fenómeno, inevitable cuando se realiza un análisis a escala de unas 200 micras, se puede disminuir muchísimo, e incluso anular, si se realiza un microanálisis de modo que casi podamos enfocar a los granos individuales de cada compuesto. Es decir, si se trabaja en modo microscopia Raman pero *in situ*. Esto, que hasta hace pocos años era impensable, hoy día es perfectamente realizable.

Las sondas Raman pueden ser acopladas a dispositivos (cabezales) que permiten colocar objetivos (de los llamadas de larga distancia que no necesitan contacto) en el extremo de las sondas, de modo que es posible hacer microscopia incluso con los instrumentos portátiles. Una sonda Raman tiene un foco de análisis entre 150 y 200 micras (0,15 mm y 0,20 mm) dependiendo del fabricante. Si en el extremo de esas sondas se coloca un objetivo de 20X, el foco disminuye hasta 10 micras, pero si se coloca un objetivo de 50X el foco se reduce hasta 3-4

micras, pudiéndose enfocar directamente a los granos de cada compuesto presente en la superficie a analizar. Estos dispositivos se conocen con el nombre genérico de microsondas.

Si la microsonda se coloca en un cabezal microscópico que se puede llevar al sitio de análisis, podemos hacer microespectroscopia Raman. Pero en este caso, hay que tomar muestra y llevarla bajo el microscopio. Sin embargo, si la microsonda se coloca en un trípode motorizado en los tres ejes X-Y-Z, es posible hacer microscopia sobre las muestras (superficies) verticales, horizontales o con curvatura. La figura 7 muestra detalles de la microsonda colocada sobre el trípode y analizando a 90° o a 180°. La única condición para poder hacer un análisis microespectroscópico correcto es tener ausencia de vibraciones sobre el trípode para garantizar un correcto enfoque durante el análisis.

En la figura 7a se aprecia el detalle del sistema portátil de microscopia Raman trabajando en el *Triclinium* de la Casa de Marcus Lucretius en Pompeya. En dicha habitación se observaron dos tonos rojos muy oscurecidos. Los restauradores del sitio arqueológico nos indicaron su sospecha de que uno de los tonos era cinabrio (bermellón), mientras que el otro era ocre rojo, aunque ambos estaban muy oscurecidos. En la bibliografía estaba ya descrito el proceso de ennegrecimiento del rojo de bermellón precisamente sobre muestras sacadas de frescos de Pompeya y analizadas por fluorescencia de rayos-X y absorción de rayos-X bajo fuente de sincrotrón (Cotte *et al.*, 2006: 7484-7494). En dicho trabajo se proponía un proceso de reducción química del sulfuro de mercurio(II) de color rojo a mercurio elemental (negro), pasando por una especie intermedia, el calomelano (Hg_2Cl_2), un cloro-complejo de mercurio(I).

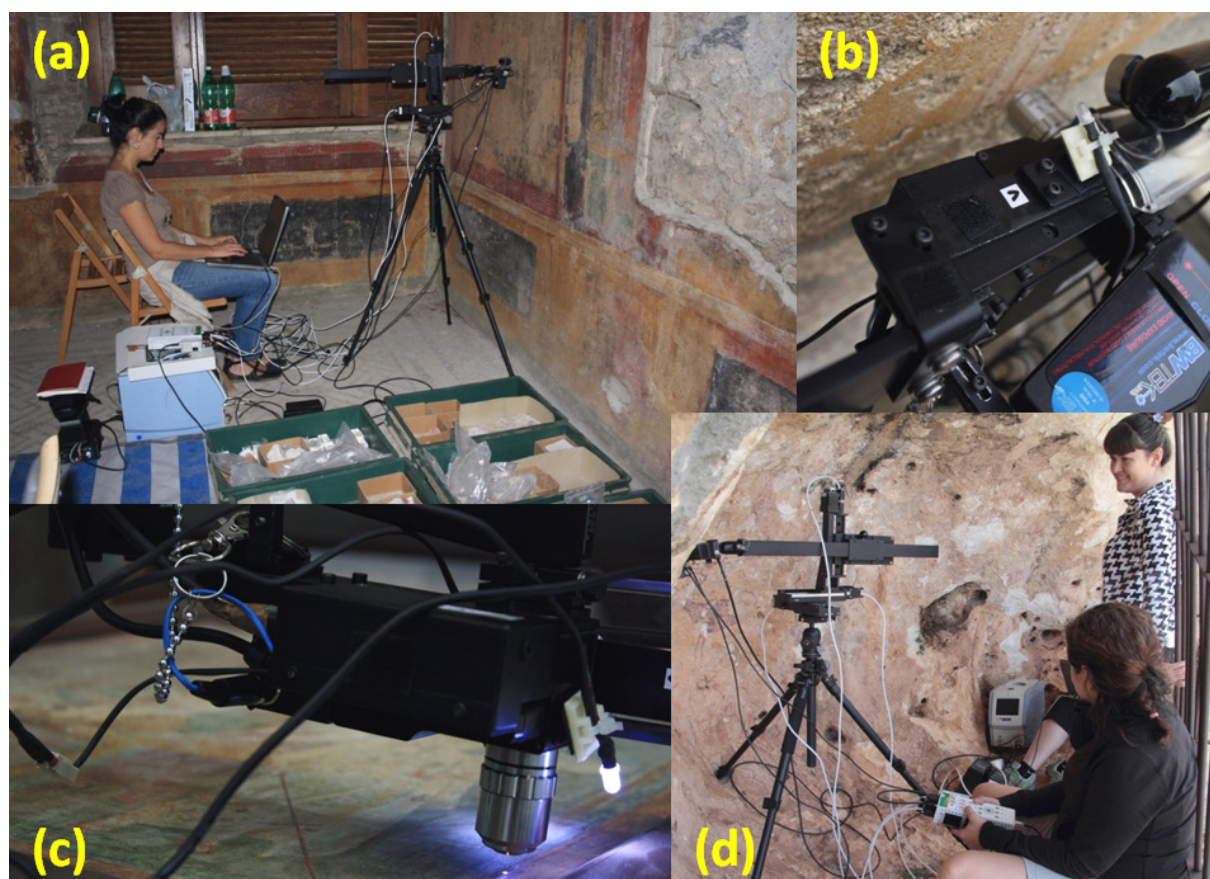


Figura 7. Detalles de la medida de microscopia Raman portátil usando un trípode motorizado para sustentar el cabezal con el objetivo, controlado por la investigadora Anastasia Giakoumaki (a), que permite medir superficies a 90° (b), a 180° (c) o en zonas curvas tal como lo realizan las investigadoras Maite Maguregui y Silvia Fernández (d).

Pues bien, el análisis *in situ* por microespectroscopia Raman reveló la presencia de calomelano, junto con cinabrio, en las zonas ennegrecidas de rojo de bermellón (el mercurio elemental no tiene señal Raman), tal como se observa en la figura 8. Es decir, con la microscopia Raman portátil pudimos llegar a las mismas conclusiones (Maguregui *et al.*, 2012: 1747-1753) que lo realizado años atrás usando una sofisticadísima instrumentación basada en el uso de una fuente sincrotrón de excitación (Cotte *et al.*, 2006: 7478-7492).

El análisis por microespectroscopia Raman portátil de las zonas ennegrecidas del ocre rojo reveló para nuestra sorpresa la presencia de calcita, yeso y magnetita sin que llegáramos a observar las señales de hematita (el compuesto responsable del color en el ocre rojo), tal como se observa en la figura 9, lo que nos sugirió que el ennegrecimiento se debía a una capa de magnetita (Fe_3O_4 , negra) posiblemente de pocas micras de espesor que estaba encima de la capa pictórica del ocre rojo (Maguregui *et al.*, 2012: 1747-1753).

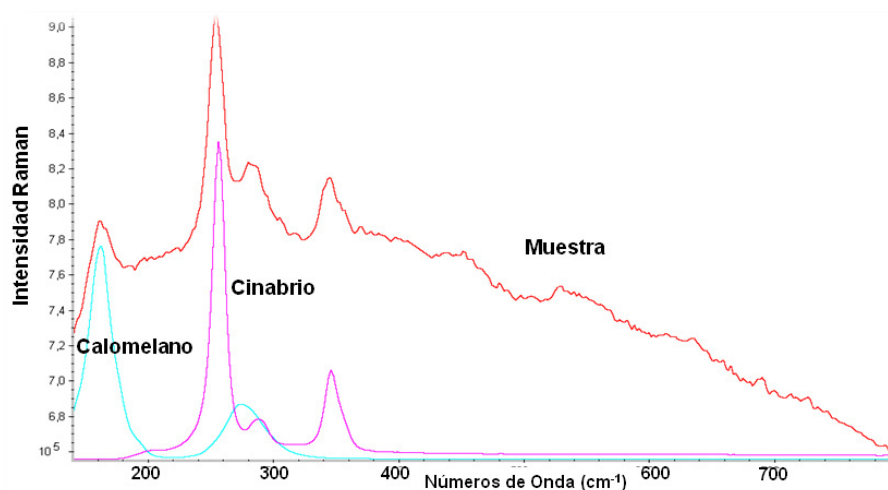


Figura 8. Espectro obtenido sobre un grano rojo ennegrecido usando la sonda de microscopia Raman en el panel de la figura 7a. En ese espectro están las señales Raman de cinabrio (HgS) y de calomelano (Hg_2Cl_2). El mercurio elemental (negro) no da señal Raman.

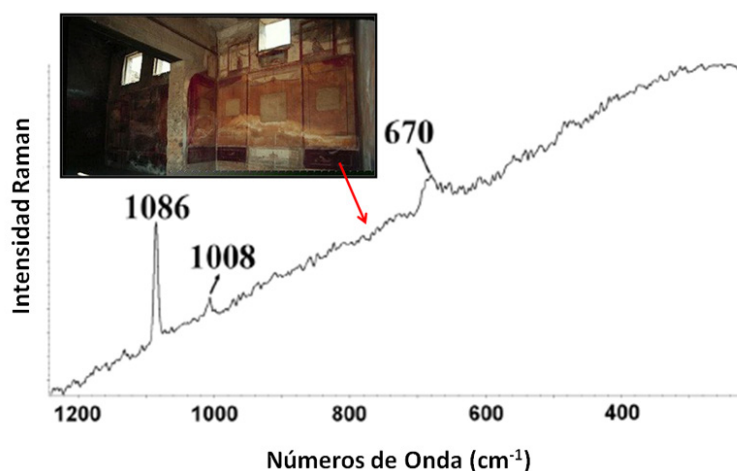


Figura 9. Espectro obtenido con la sonda de microscopia Raman sobre el panel de ocre rojo ennegrecido mostrado en la figura. Se observan las tres señales características de magnetita (670 cm^{-1}), yeso (1008 cm^{-1}) y calcita (1086 cm^{-1}). Como no se observa señal de hematita, se debe concluir que la magnetita está formando una capa encima de la capa de hematita original.

Medidas multianalíticas *in situ* para caracterización y diagnóstico

La espectroscopia Raman portátil puede ser complementada con otras técnicas portátiles de análisis no destructivo para la determinación elemental (XRF, espectrometría de fluorescencia de rayos-X y/o LIBS, *Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) y/o para la caracterización molecular (espectroscopia infrarroja, especialmente en modo DRIFT). Todos estos instrumentos portátiles de alta sensibilidad permiten hacer análisis *in situ* incluso a escala microscópica, reduciendo las necesidades de tomar muestras, aunque sea en la escala milimétrica.

Un ejemplo de las nuevas aplicaciones de la química analítica mediante el uso combinado de varias técnicas portátiles en el campo del diagnóstico de impactos ambientales sobre elementos del Patrimonio Cultural fue nuestro trabajo para esclarecer el proceso que conducía al ennegrecimiento del ocre rojo en las pinturas expuestas al ambiente de la Ciudad Arqueológica de Pompeya (Italia). Fue necesario realizar un exhaustivo análisis en muchos paneles usando no solo espectroscopia Raman, sino también espectrometría por fluorescencia de rayos-X (XRF) y espectroscopia infrarroja por reflectancia difusa (DRIFT), usando siempre instrumentos portátiles tal como se aprecia en los detalles de las figuras 10 y 11 (Maguregui *et al.*, 2011: 3319-3326; Maguregui *et al.*, 2012: 1747-1753).

Los análisis Raman realizados de modo aleatorio sobre el conjunto de superficies con restos o policromía de ocre rojo (ennegrecida o tal cual) revelaron la aparición de fenómenos de fluorescencia. Como en los frescos de Pompeya no existen silicatos, la hipótesis se centró



Figura 10. Análisis Raman sobre ocre amarillos y rojos en Pompeya, realizados por el autor con la investigadora Maite Maguregui (izquierda). Análisis XRF y Raman sobre una misma pared con restos de pintura mural realizados por los investigadores Maite Maguregui, Anastasia Giakoumaki y Kepa Castro (derecha).

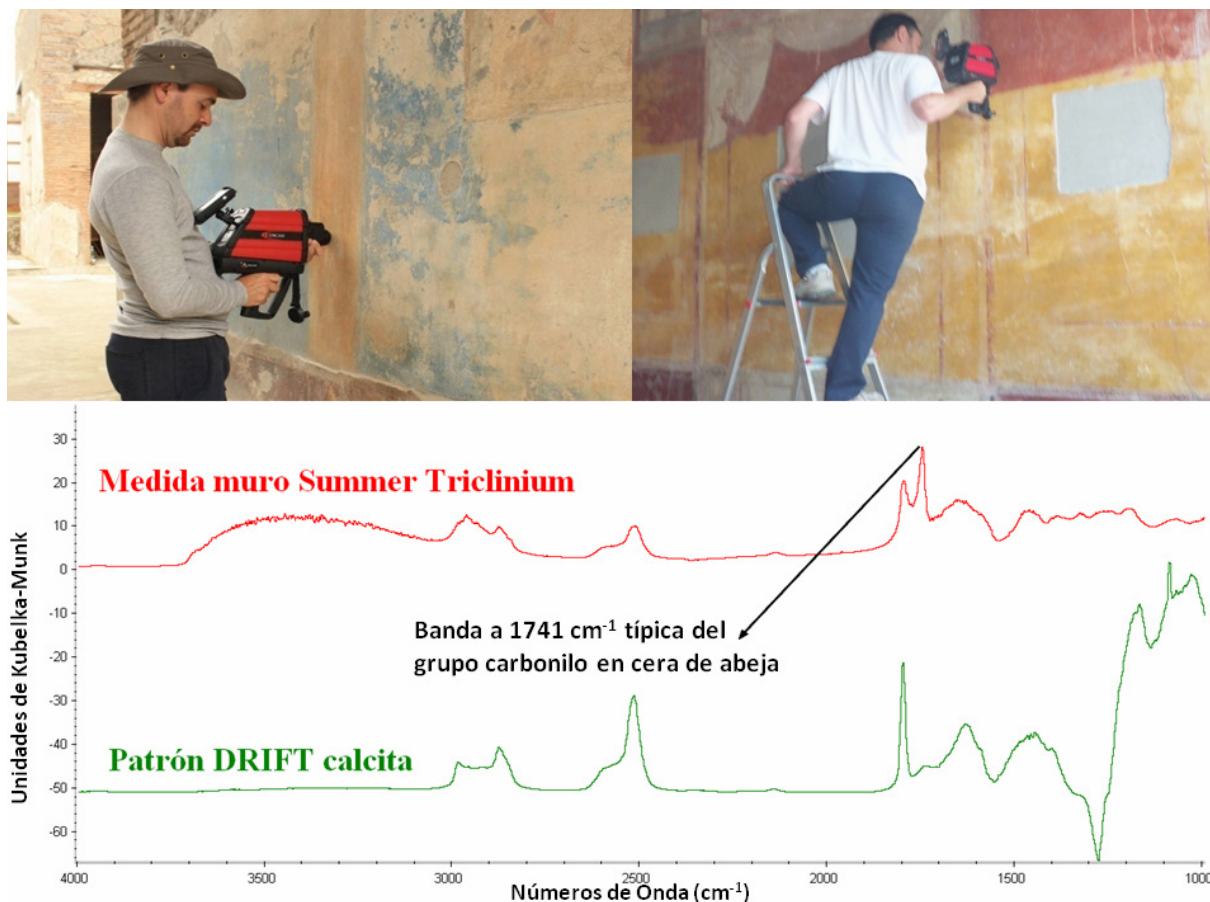


Figura 11. Análisis con espectroscopia Infrarroja por reflectancia difusa (DRIFT) portátil sobre pinturas murales en casas de Pompeya realizados por Kepa Castro. Espectro DRIFT de una zona sin capa pictórica y de un patrón de calcita (el compuesto del mortero), donde las bandas que no se explican por el mortero se deben a una cera de abeja aplicada intencionadamente para proteger las paredes que todavía conservan pinturas murales.

en la presencia de polímeros orgánicos. Los análisis por espectroscopia DRIFT sobre morteros sin restos de policromía revelaron la presencia de un compuesto orgánico (véase figura 11) que se pudo asignar a cera de abeja (las bandas de vibración C-H de la cera de abeja en la región 2800-3000 cm^{-1} están enmascaradas por señales de la calcita y no se observan con claridad). Estos mismos análisis por DRIFT sobre las zonas ennegrecidas del ocre rojo revelaron la presencia de la cera junto con calcita y magnetita (la hematita no da señal en el intervalo de números de onda de la técnica DRIFT), tal como se observa en la figura 12.

Los resultados conjuntos por espectroscopia Raman, DRIFT y XRF mostraron sistemáticamente la presencia de magnetita (Fe_3O_4 , negra) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) junto con la hematita (Fe_2O_3) y la calcita (CaCO_3). Para explicar la presencia simultánea de estos cuatro compuestos, se elaboraron varios modelos químicos de reacciones entre la hematita depositada sobre un mortero de calcita y los agentes químicos presentes en la atmósfera (CO_2 y SO_2 , principalmente). El modelo capaz de explicar el conjunto de los resultados proponía un ataque reductor por el SO_2 atmosférico sobre la hematita para dar magnetita y ácido sulfúrico, que reacciona con la calcita para dar sulfato de calcio en forma de yeso:



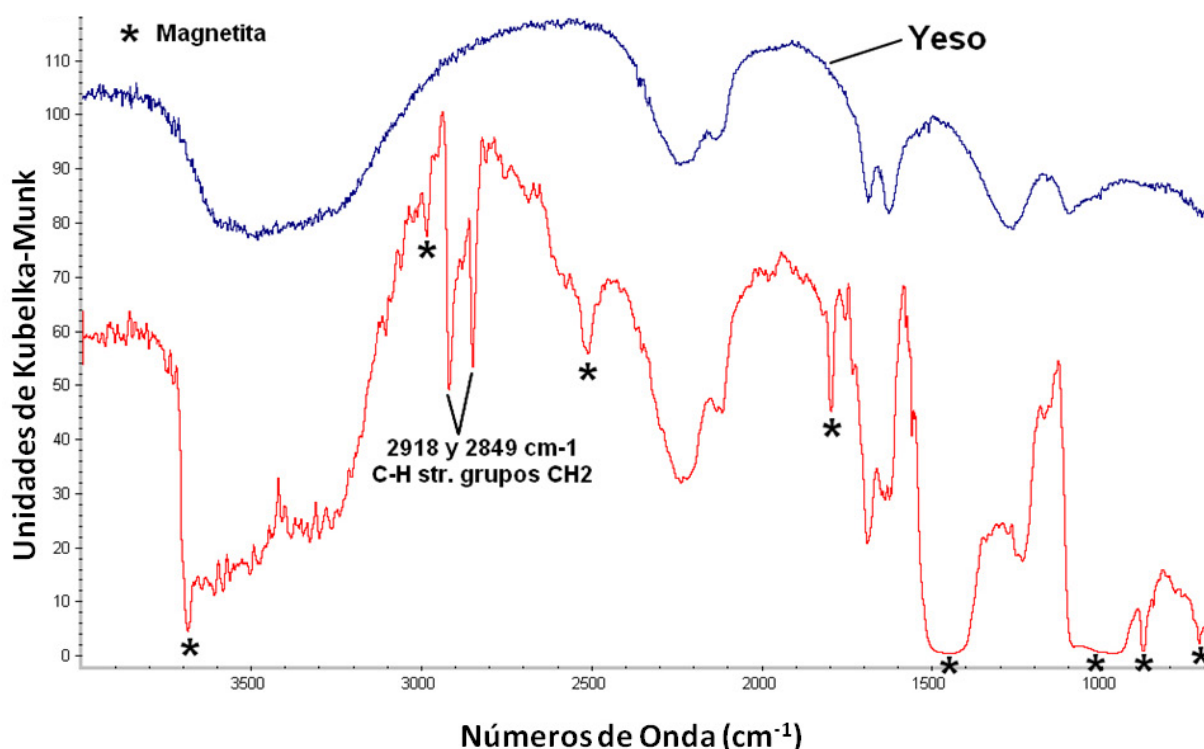


Figura 12. Espectro DRIFT de una zona ennegrecida de ocre rojo, donde se observan las señales de calcita, magnetita y cera de abeja.

Este modelo se pudo comprobar experimentalmente a través de una serie de ensayos de envejecimiento acelerado donde se formaron todos los compuestos químicos que el modelo predecía y que experimentalmente se determinaron en los análisis de campo (Maguregui *et al.*, 2014: 372-378).

En ese trabajo se realizaron una serie de predicciones sobre las condiciones ambientales requeridas para transformar la hematita (roja) a magnetita (negro), compuesto responsable del ennegrecimiento de los paneles. En la parte inferior de la figura 13 se aprecia un típico ocre rojo ennegrecido en los paneles del *Scriptorium* de la Casa de Marcus Lucretius (Pompeya). Hoy día seguimos encontrando mucha literatura donde se insiste en la estabilidad de los ocre rojos. Muchos colegas que trabajaron con nosotros creían que la hematita no se podía transformar. Pero ahora, los restauradores saben en qué condiciones (alta humedad y persistencia de SO_2 en la atmósfera en contacto con la obra) es posible observar esa transformación y pasar de un rojo intenso a un rojo oscurecido, pudiendo tomar las medidas correctoras para evitar dicha transformación. Desde un punto de vista de la química analítica, la clave para resolver este problema estuvo en las medidas iniciales con espectroscopia Raman portátil que permitieron identificar los dos compuestos clave de la transformación de hematita: yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y magnetita (Fe_3O_4).

En la parte superior de la figura 13 (paneles del *Scriptorium* de la Casa de Marcus Lucretius, Pompeya) se observan colores rojos en lugares donde no son lógicos por la composición pictórica, algunos de los cuales están ennegrecidos. El análisis Raman y la XRF revelaron que no era un ocre rojo original, sino que era una hematita que se había transformado desde un ocre amarillo por el impacto térmico ($>400^\circ\text{C}$) de la erupción del Vesubio. Este es un trabajo que hoy día estamos concluyendo y que en breve será enviado a publicar, pero la



Figura 13. El profesor Tamisto (Universidad de Helsinki), director de la excavación que estábamos estudiando, explicando a Kepa Castro los ennegrecimientos de los ocreos rojos (parte inferior de las paredes) así como el cambio térmico de los ocreos amarillos a hematita (roja) donde se dibuja perfectamente cómo quedaron las cenizas de la erupción en esa casa.

espectroscopia Raman portátil, combinada con la espectrometría de fluorescencia de rayos-X, nos ha permitido detectar muchísimas composiciones pictóricas donde el amarillo original se ha transformado a rojo por el impacto térmico, y en los últimos años, parte de esos rojos transformados se han oscurecido debido a la formación de magnetita por el impacto moderno de la atmósfera alrededor de Pompeya.

Conclusiones

La espectroscopia Raman portátil es ya una realidad que puede ser utilizada en cualquier emplazamiento, museo, iglesia, etc., incluso haciéndola trabajar en modo microscopia.

En el futuro cercano, la espectroscopia Raman portátil va a ser una herramienta que permitirá ir más allá de la caracterización (esto es ahora un estándar y muchas revistas científicas lo consideran no innovador), enfatizando su papel clave en las tareas de diagnóstico, especialmente en situaciones de toma de decisión en tiempo real y en el espacio concreto de análisis.

La espectroscopia Raman puede resolver por sí sola muchos de los problemas de caracterización/diagnóstico. Sin embargo, la experiencia indica que es interesante incorporar (en la medida de las posibilidades) otras técnicas analíticas para realizar los análisis *in situ* de un modo completo, explotando las especificidades que aporta cada una de ellas.

Aunque en este trabajo no se han presentado resultados de análisis cuantitativo, cada vez son más los trabajos científicos que proponen la espectroscopia Raman como una técnica para hacer análisis cuantitativo *in situ*. Cuando esa práctica se generalice, el siguiente paso será incorporar las técnicas quimiométricas de análisis de datos, ya que es una herramienta que permite extraer el máximo de información del conjunto de espectros que se pueden generar por cada una de las técnicas portátiles que se hayan utilizado en una determinada campaña de análisis.

Para concluir, es necesario señalar que en el corto-medio plazo se popularizará un nuevo modo de trabajar con la espectroscopia Raman. Es el modo *stand-off* o análisis a distancia (desde centímetros hasta varios metros) que ya está siendo implantado en alguna de las otras técnicas analíticas a las que se ha aludido en este trabajo.

Bibliografía

- ARAMENDIA, J.; GÓMEZ-NUBLA, L.; CASTRO, K.; MARTÍNEZ-ARKARAZO, I.; VEGA, D.; SANZ LÓPEZ DE HEREDIA, A.; GARCÍA IBAÑEZ DE OPACUA, A., y MADARIAGA, J. M. (2012): «Portable Raman study on the conservation state of four CorTen steel-based sculptures by Eduardo Chillida impacted by urban atmospheres». *Journal of Raman Spectroscopy*, 43: 1111-1117.
- COTTE, M.; SUSINI, J.; METRICH, N.; MOSCATO, A.; GRATZIU, C.; BERTAGNINI, A., y PAGANO, M. (2006): «Blackening of Pompeian Cinnabar Paintings: X-ray Microspectroscopy Analysis». *Analytical Chemistry*, 78: 7478-7492.
- CASADIO, F., y TONIOLO, L. (2001): «The analysis of polychrome works of art: 40 years of infrared spectroscopic investigations». *Journal of Cultural Heritage*, 2: 71-78.
- CLARK, R. J. H. (1995): «Raman microscopy: application to the identification of pigments on medieval manuscripts». *Chemical Society Reviews*, 24: 187-196.
- GUINEAU, B. (1984): «Analyse non destructive des pigments par microsonde Raman laser.: exemples de l'azurite et de la malachite». *Studies in Conservation*, 29: 35-41.
- (1984): «Microanalysis of painted manuscripts and of coloured archeological materials by Raman laser microprobe». *Journal of Forensic Science*, 29: 471-485.
- HERNANZ, A.; RUIZ, J. F.; GAVIRA-VALLEJO, J. M.; MARTIN, S., y GAVRILENKO, I. (2010): «Raman microscopy of prehistoric rock paintings from the Hoz de Vicente, Minglanilla, Cuenca, Spain». *Journal of Raman Spectroscopy*, 41: 1394-1399.
- ŁYDZ'BA-KOPCZYŃSKA, B., y MADARIAGA, J. M. (2016): «Applications of Raman spectroscopy in Art and Archaeology». *Journal of Raman Spectroscopy*, 47: 1004-1007.
- MADARIAGA, J. M. (2015): «Analytical Chemistry in the field of cultural heritage». *Analytical Methods*, 7: 4848-4876.
- MAGUREGUI, M.; KNUUTINEN, U.; MARTÍNEZ-ARKARAZO, I.; CASTRO, K., y MADARIAGA, J. M. (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: 3319-3326.
- MAGUREGUI, M.; KNUUTINEN, U.; MARTÍNEZ-ARKARAZO, I.; GIAKOU MAKI, A.; CASTRO, K., y MADARIAGA, J. M. (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: 1747-1753.
- MAGUREGUI, M.; CASTRO, K.; MORILLAS, H.; TREBOLAZABALA, J.; KNUUTINEN, U.; WIESINGER, R.; SCHEREINER, M., y MADARIAGA, J. M. (2014): «Multianalytical Approach to explain the darkening process of

hematite pigment in paintings from ancient Pompeii after accelerated weathering experiments». *Analytical Methods*, 6: 372-378.

PÉREZ-ALONSO, M.; CASTRO, K.; ÁLVAREZ, M., y MADARIAGA, J. M. (2004): «Scientific analysis versus restorer's expertise for diagnosis prior to a restoration process: the case of Santa Maria Church (Hermo, Asturias, North of Spain)». *Analytica Chimimica Acta*, 524: 379-389.

PITARCH, Á.; RUIZ, J. F.; FDEZ.-ORTIZ DE VALLEJUELO, S.; HERNANZ, A.; MAGUREGUI, M., y MADARIAGA, J. M. (2014): «*In situ* characterization by Raman & X-Ray Fluorescence spectroscopy of post-paleolithic blackish pictographs exposed to open air in Los Chaparros Shelter». *Analytical Methods*, 6: 6641-6650.

RULL, F.; SANSANO, A., y MEDINA, J. (2005): «Case study: 10th century manuscript Beato de Valcavado», en: H. G. M. EDWARDS y J. M. CHALMERS (eds.), *Raman Spectroscopy in Archaeology and Art History*, pp. 212-219. Cambridge: Royal Society of Chemistry.

VENERANDA, M.; COSTANTINI, I.; FDEZ.-ORTIZ DE VALLEJUELO, S.; GARCÍA, L.; GARCÍA-CAMINO, I.; CASTRO, K.; AZKARATE, A., y MADARIAGA, J. M. (2016): «Study of corrosion in archaeological gilded irons by Raman imaging and a coupled scanning electron microscope-Raman system». *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374: 20160046.

VENERANDA, M.; ARAMENDIA, J.; GÓMEZ, O.; FDEZ.-ORTIZ DE VALLEJUELO, S.; GARCÍA, L.; GARCÍA-CAMINO, I.; CASTRO, K.; AZKARATE, A., y MADARIAGA, J. M. (2017): «Characterization of archaeometallurgical artefacts by means of portable Raman systems: corrosion mechanisms influenced by marine aerosol». *Journal of Raman Spectroscopy*, 48: 258-266.

Tecnología digital 3D aplicada a la documentación, reconstrucción y difusión del patrimonio cultural

Carlos Bayod Lucini

Factum Arte

carlos@factum-arte.com

Resumen: La preservación del patrimonio histórico y cultural es una responsabilidad de todos para con las futuras generaciones. La tecnología digital es hoy día una herramienta esencial para esta tarea. Utilizada adecuadamente nos permite documentar con el máximo detalle una obra de arte, un sitio arqueológico o un elemento natural en su estado actual, antes de que cambie, se deteriore o desaparezca por el paso del tiempo o por la acción del hombre. Para que la digitalización 3D del patrimonio sea de verdadera utilidad, es importante tener en cuenta dos aspectos. Por un lado, debe realizarse a la máxima resolución posible: una mayor cantidad de puntos de información puede ser la clave para que en el futuro se pueda seguir aprendiendo a partir del archivo digital generado. Por otro lado, el formato en el que se archiva la información debe ser adecuado para su transmisión, no solo con los medios tecnológicos actuales, sino también para el futuro.

Palabras clave: Digitalización, 3D, patrimonio, Lucida, Egipto.

Abstract: Preservation of historic and cultural heritage is a shared duty with the future generations. Digital technology is nowadays an essential tool for this task. When used properly, it allows us to document with all detail an artwork, an archeological site or a natural element in its current conservation state, before it changes, gets damaged or disappears due to aging or mistreatment. In order for 3D digitization of Heritage to be really useful, it is important to consider two aspects. First, the documentation should be done at the highest possible resolution: a larger amount of information points could be essential for extending over time the validity of the generated file as source for knowledge. Second, the archiving format must be adequate for its transmission, not only with current systems but also with future technology.

Keywords: Digitization, 3D, Heritage, Lucida, Egypt.

En abril de 2014 abrió al público la réplica de la tumba de Tutankamón, con el fin de contribuir a la conservación de la original. Realizada por Factum Arte, se trata de la reproducción exacta de uno de los monumentos más conocidos del mundo. El facsímil fue realizado en Madrid mediante el uso de la tecnología digital en combinación con técnicas artesanales tradicionales, a partir de información obtenida de la tumba original (figura 1).



Figura 1. Facsímil de la Tumba de Tutankamón, inaugurado en 2014. Fotografía: Factum Arte.

La tumba de Tutankamón fue concebida para durar eternamente, pero no para ser visitada. Desde su descubrimiento en los años veinte del siglo pasado, y como consecuencia de la fama que le proporcionó el hecho de haber sido hallada con su contenido funerario prácticamente intacto, el monumento ha sido visitado hasta la fecha por miles de personas.

Tratándose de un espacio relativamente reducido, que carece de las condiciones de ventilación adecuadas, el tránsito diario de un gran número de personas durante décadas ha producido unas condiciones ambientales en el interior de la tumba perjudiciales para su conservación. Entre otras posibles causas, los cambios de humedad y temperatura producidos por la evapotranspiración de las personas que visitan el monumento han hecho que una parte notable de la pintura que decora la cámara funeraria se esté desprendiendo del muro.

La iniciativa de realizar un facsímil de la tumba de Tutankamón mediante tecnología digital surgió, por tanto, como respuesta a un problema que requería de urgente solución: cómo asegurar la conservación de un monumento arqueológico tan importante, garantizando su transmisión a las futuras generaciones de la forma más inalterada posible, al tiempo que se mantiene el acceso a un creciente número de turistas interesados en conocer de primera mano la experiencia de su contemplación.

Por este motivo se llevó a cabo una digitalización completa en color y tres dimensiones de las paredes de la cámara funeraria, del sarcófago y de su cubierta en alta resolución, de forma que la información obtenida ofreciera documentación precisa de su estado de conservación, y permitiera fabricar una reproducción a escala real con el máximo detalle posible.

Digitalización de superficie

La digitalización de la tumba de Tutankamón se llevó cabo en 2009. Durante ocho semanas, un equipo de Factum Arte dirigido por su director y fundador Adam Lowe empleó varios sistemas de escaneo 3D y fotografía a color, adaptándolos a las necesidades específicas del proyecto.

Se utilizaron dos sistemas complementarios para la digitalización 3D de los muros y de la superficie exterior del sarcófago: un escáner 3D de luz estructurada (luz blanca) y un escáner láser, con capacidad de obtener información con una resolución aproximada de 100 micras ($10\,000$ puntos/cm²) (figura 2)

Con el fin de que la información obtenida sea relevante, resulta esencial escanear tanto la forma general de las paredes como los detalles de la textura, a la máxima resolución que nos permita la tecnología. A la hora de elegir los sistemas de escaneo es importante valorar que se dé una correspondencia entre la información digital obtenida y la superficie del original, tanto para documentación como para su reproducción en forma de facsímil (figura 3).

Para la digitalización del color se ideó un sistema de captura paralelo con iluminación incorporada. Además de los sistemas de escaneo digital, se realizaron cientos de muestras de color que, en comparación con los colores de la tumba, habrían de servir en el futuro como referencia visual para comprobar la calidad de impresión (figura 4).



Figura 2. Técnicos de Factum Arte digitalizando la tumba de Tutankamón en 2009.

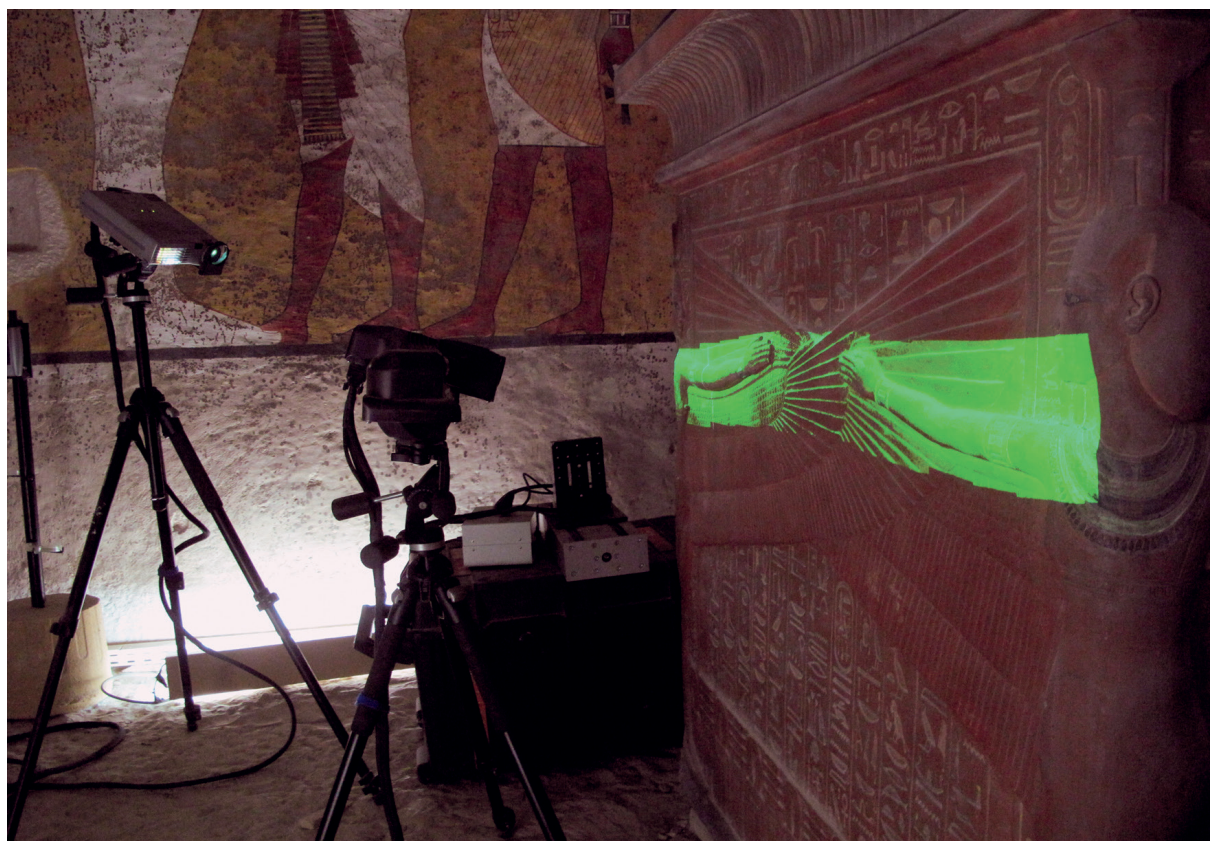


Figura 3. Escáner de luz estructurada (luz blanca) digitalizando el sarcófago.

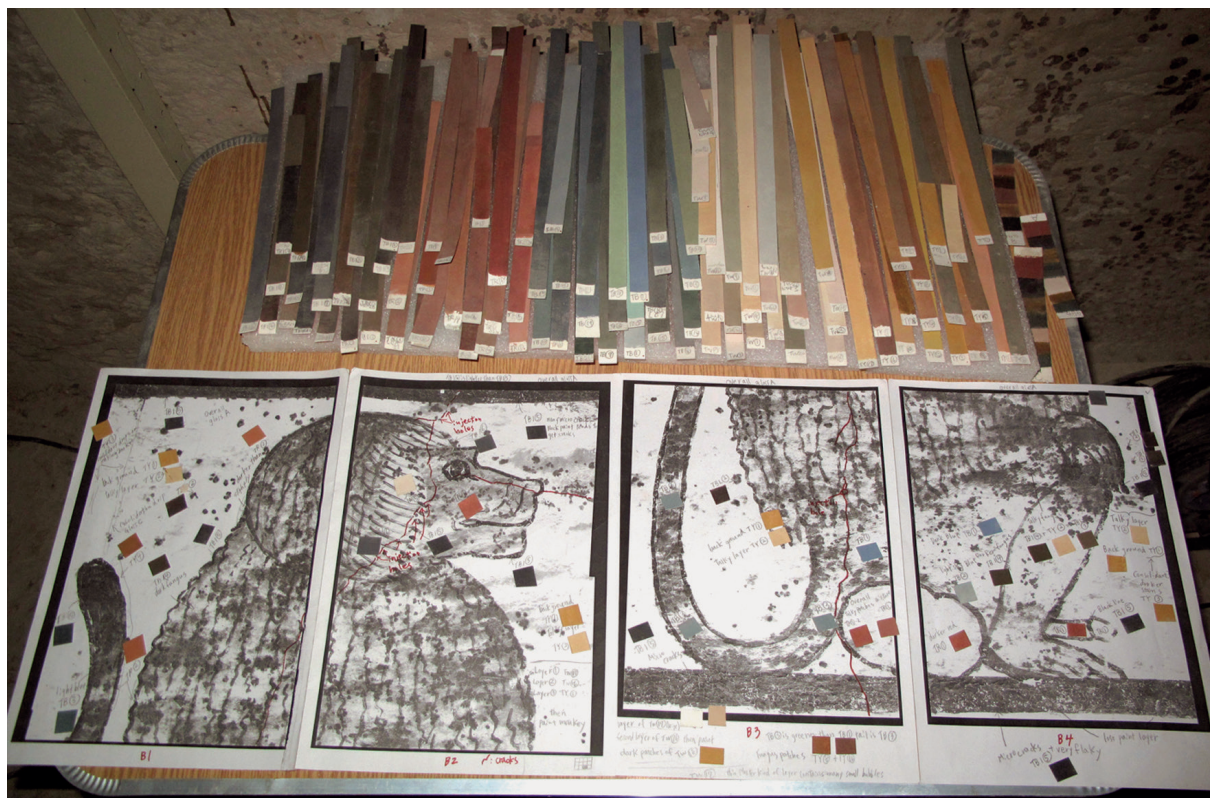


Figura 4. Muestras de color realizadas como referencia para la impresión.

Capas de información

La captura de información de color (2D) y de relieve (3D) de las paredes de la cámara funeraria y del sarcófago se obtuvo, por tanto, con sistemas diferentes. Una de las tareas principales del procesamiento consistió en el registro de las capas de información, de forma que la información de color estuviera superpuesta con la de relieve. Para ello se utilizaron programas de procesamiento de imagen como Photoshop, en un proceso semiautomático en el que la figura del «artesano digital» es clave para su realización (figura 5).

A partir de este punto, la información digital puede ser utilizada para la fabricación del facsímil. Una vez que los datos han sido procesados, la reproducción material se realizó también de forma separada. Por un lado, el relieve de los muros obtenido con escaneado 3D se prototipó mediante fresadora CNC de tres ejes sobre planchas de resina de poliuretano de alta densidad. Este material no será utilizado como el material final del facsímil, sino como primer prototipo a partir del cual obtener moldes (figura 6).

Por otro lado, para la reproducción del color se ideó un tipo de piel elástica realizada con yeso acrílico que permitiera una alta calidad de color. La impresión se realizó en la impresora plana multicapa desarrollada por Factum Arte. Esta piel se registró a continuación de forma manual, utilizando puntos de control, sobre las planchas de resina y fibra de vidrio que contenían la información de la textura. De esta forma, la capa de color y la capa de relieve de los muros volvían a estar unidas materialmente.

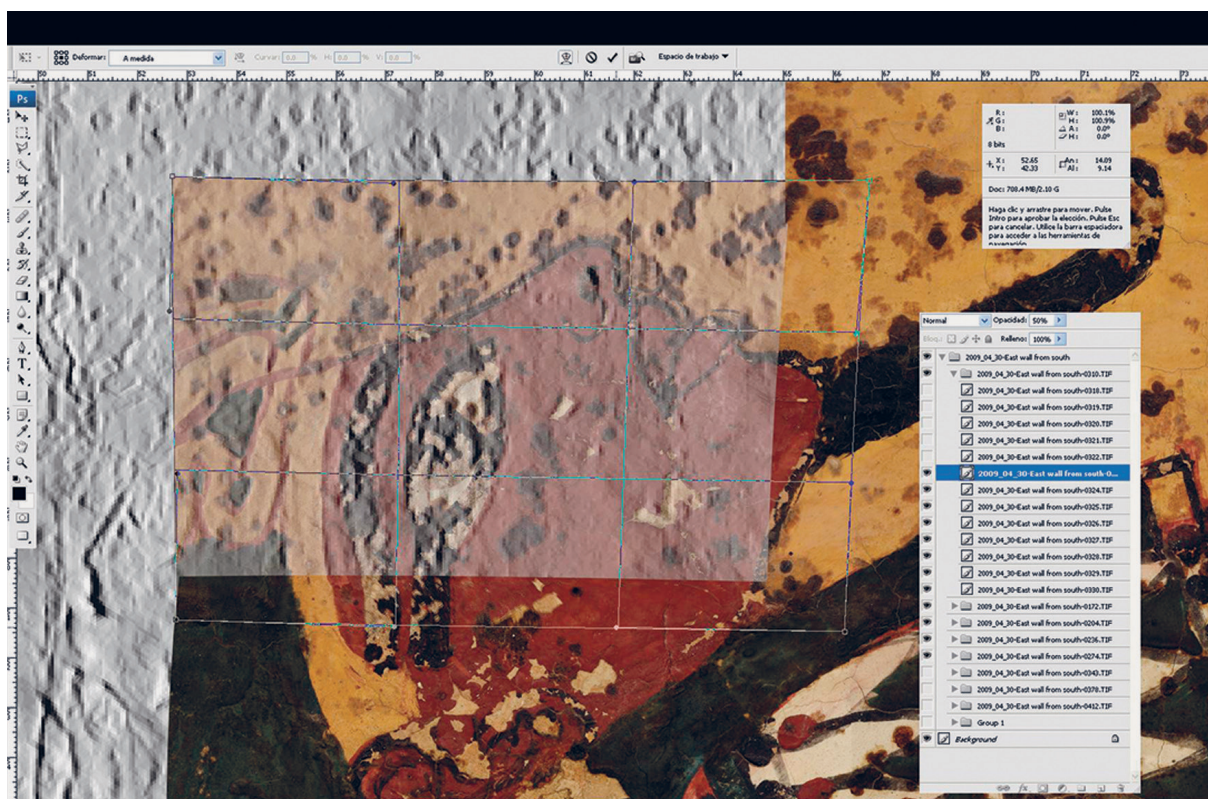


Figura 5. Registro digital de la capa de color (2D) sobre el *render* del relieve (3D).



Figura 6. Fresadora CNC de tres ejes prototipando el relieve sobre panel de resina.

Una vez que la piel ha sido registrada sobre el soporte que contiene el relieve, se aplicó el pegamento y se utilizó una máquina de vacío para que éste cure y ambos materiales queden unidos. La realización de un facsímil no tiene necesariamente que ser realizada en el mismo material que el original, ya que la intención principal es restituir el aspecto visual del monumento.

Para el facsímil de la tumba de Tutankamón se utilizaron materiales ligeros, como la resina y la fibra de vidrio, para recrear la superficie y color de las paredes de la cámara funeraria y del sarcófago en secciones modulares. La tapa del sarcófago se realizó en estuco imitando el material original. El techo de la cámara funeraria se ejecutó con paneles ligeros de aluminio cubiertos con cemento trabajado a mano.

Procesos como este requieren de una experimentación constante. Para Factum Arte cada proyecto es único y requiere de un desarrollo específico. No es lo mismo digitalizar una obra de arte o un monumento para visualizar los datos en una pantalla o en un entorno de realidad virtual que hacerlo para su reproducción material en forma de facsímil a escala real. Es primordial garantizar que el carácter de la superficie del original se restituya adecuadamente en el facsímil, de forma que, observado desde el mismo punto de vista y con la misma iluminación, resulten prácticamente indistinguibles (figura 7).



Figura 7. Proceso de fijación de piel elástica sobre el relieve.

Restauración digital

Una de las aplicaciones de tecnología digital que ofrece mayor potencial es la posibilidad de restaurar o reconstruir virtualmente un elemento dañado o perdido. El facsímil de Tutankamón brindó la oportunidad de recrear un fragmento del muro sur que se encuentra actualmente perdido y del que únicamente existe una fotografía en blanco y negro como referencia. La fotografía utilizada fue tomada por Harry Burton y pertenece a la colección del Instituto Griffith de Oxford.

Utilizando los datos de superficie de los muros de la cámara funeraria, se generó un archivo nuevo en el que, tomando la fotografía en blanco y negro como base, se añadió información de color y de textura. Este archivo se utilizó posteriormente para fabricar este fragmento del muro sur con los mismos materiales que el resto del facsímil.

El trabajo de restauración digital es, por definición, especulativo, pues se trata esencialmente de la materialización de una hipótesis. Se podrían hacer distintas versiones del aspecto que tendría a día de hoy un objeto perdido. La colaboración entre técnicos, conservadores e historiadores resulta esencial para que una restauración virtual sea relevante.

El fragmento del muro sur perdido y recreado digitalmente forma parte del facsímil de la tumba de Tutankamón que se puede visitar hoy día en Luxor, a la entrada del Valle de los Reyes. Su presencia e integración con el resto de la reproducción permite al visitante comprender mejor la historia del monumento, en concreto la historia de su conservación desde su descubrimiento hace ya casi un siglo. La experiencia de contemplar un facsímil que, de alguna

forma, se presenta más completo que el original, puede permitir un acercamiento más natural al monumento y a su historia.

Los objetos que forman nuestro patrimonio cultural tienen trayectorias dinámicas que condicionan su estado de conservación actual. La digitalización en alta resolución y su reproducción en forma de facsímil permiten leer estas dinámicas. Y, tal vez, la reproducción del fragmento perdido del muro sur formando parte del conjunto pueda eventualmente ayudar a recuperarlo.

Turismo sostenible

Cinco años después de la digitalización de la tumba original, se dieron finalmente las condiciones para completar el proyecto de instalación del facsímil que, desde el inicio del proyecto, había sido concebido para ser establecido en Egipto. Se seleccionó una zona aneja a la Casa de Howard Carter, a la entrada del Valle de los Reyes, donde se ubicaría la reproducción de la tumba de Tutankamón de forma permanente.

Se contrató al arquitecto egipcio Tarek Waly para desarrollar los planos y dirigir las obras de construcción de un espacio excavado en el terreno donde instalar el facsímil. Se emplearon materiales y medios de construcción tradicionales y mano de obra local. Una vez preparado el espacio, el facsímil se trasladó en módulos para su montaje *in situ* por un equipo de Factum Arte (figura 8).



Figura 8. Factum Arte montando el facsímil de la tumba de Tutankamón en 2014.

El facsímil se inauguró en abril de 2014. La reproducción de la cámara funeraria se completó con una exposición fotográfica complementaria sobre la historia del descubrimiento y conservación de la tumba original, en colaboración con el Instituto Griffith.

La tumba de Tutankamón se encuentra actualmente abierta al público, como uno de los reclamos turísticos más importantes de Egipto. Es una posibilidad que, en el futuro, la tumba original deba ser cerrada al público por razones de conservación. Hoy día, el turista que acude al Valle de los Reyes, tiene la oportunidad única de visitar las dos tumbas, la original y la reproducción a pocos minutos de distancia, y comparar la experiencia de contemplar cada una de ellas.

Un facsímil, si se realiza prestando la máxima atención al detalle, puede ser la respuesta adecuada a la idea de un turismo sostenible, en que el visitante no es parte del problema de la degradación del monumento, sino parte de su solución. La reproducción de la tumba de Tutankamón permite separar la experiencia de su contemplación de la responsabilidad de su conservación. Es por ello que un proyecto como éste cobra sentido cuando el facsímil se instala en el Valle de los Reyes, en lugar de formar parte de un museo, ya que supone una buena noticia para el turismo en Egipto, que no atraviesa uno de sus mejores momentos.

Acceso a los datos

Los datos 3D y 2D de la tumba de Tutankamón obtenida por Factum Arte en 2009 se encuentran disponibles en la página web para su visualización (www.highres.factum-arte.org/Tutankhamun/). Mediante un navegador de uso sencillo se puede inspeccionar la información de relieve y color de los muros en alta resolución. Y lo que es quizás más importante, se pueden ver ambas capas por separado y estudiar el relieve de las paredes de la cámara funeraria sin la «distracción» del color.

La posibilidad de inspeccionar el relieve sin el color desde el propio ordenador, a través de *renders* o simulaciones realizadas a partir de los archivos 3D, ofrece un nuevo punto de vista de la tumba que puede llevar a nuevos descubrimientos. En el año 2015, el arqueólogo británico Nicholas Reeves publicó un artículo en el que proponía una hipótesis innovadora: tras los muros de Tutankamón se encuentran cámaras todavía por descubrir que podrían pertenecer, según su argumento, a la tumba de la reina Nefertiti.

Mediante la inspección de los datos 3D obtenidos por Factum Arte, Reeves ha creído observar en los muros norte y oeste lo que podrían ser señales de unas aberturas con forma de puertas que fueron cerradas en su día, y que habrían pasado inadvertidas ocultas bajo la pintura. La información digital del relieve revela, en efecto, un cambio en la topografía del muro que sigue una forma más o menos rectangular, y que podría responder a unos huecos de paso a otras salas.

El gobierno egipcio está llevando a cabo una serie de pruebas para tratar de confirmar o descartar la presencia de cámaras tras los muros de la tumba de Tutankamón, sin resultados concluyentes a día de hoy. La hipótesis de Reeves ha provocado reacciones de todo tipo. Por tratarse de un tema sensible, ha tenido numerosos detractores dentro y fuera de Egipto. Pero también ha inspirado la imaginación de mucha gente ante la posibilidad de que un hallazgo de tanta relevancia histórica pudiera ser realidad.

La intención de Factum Arte a la hora de facilitar el acceso a información 3D en alta resolución no es otra que la de contribuir a la conservación, difusión y conocimiento del patrimonio cultural mundial, con el fin de poder transmitir su importancia a las futuras generaciones.

Desarrollo tecnológico

La digitalización en 3D de la superficie de una obra de arte es un campo de estudio relativamente reciente. Se trata de un tipo de análisis digital que permite documentar y monitorizar los cambios en la superficie, así como rematerializar la información 3D obtenida en múltiples formas y con diferentes aplicaciones, entre ellas la construcción de facsímiles. La utilidad de este tipo de digitalización depende de la calidad de los datos 3D obtenidos y su correspondencia con la superficie real del objeto.

Factum Arte acumula una amplia experiencia en el uso de la tecnología digital para escanear las más importantes obras del patrimonio artístico y cultural en todo el mundo. En función de los requerimientos específicos de cada proyecto, ha utilizado y adaptado diferentes tipos de sistemas de escaneado disponibles en el mercado, buscando siempre alcanzar los más altos niveles de calidad.

Tras muchos años utilizando y adaptando sistemas que habían sido diseñados para otros usos, Manuel Franquelo y Adam Lowe decidieron crear el escáner 3D Lucida, un sistema ideado específicamente para el campo de la conservación de patrimonio. Fabricado por Factum Arte con el soporte económico y logístico de la Fundación Factum, Lucida ha sido concebido y desarrollado por Franquelo para escanear la superficie de pinturas, frescos y otros objetos de bajo relieve (figura 9).

Lucida es un escáner láser de triangulación que ha resuelto el problema del contraste tonal y el brillo de la superficie mediante un sistema de hardware innovador y una serie de algoritmos desarrollados para reducir el ruido de la información 3D, sin alterar las características del relieve.

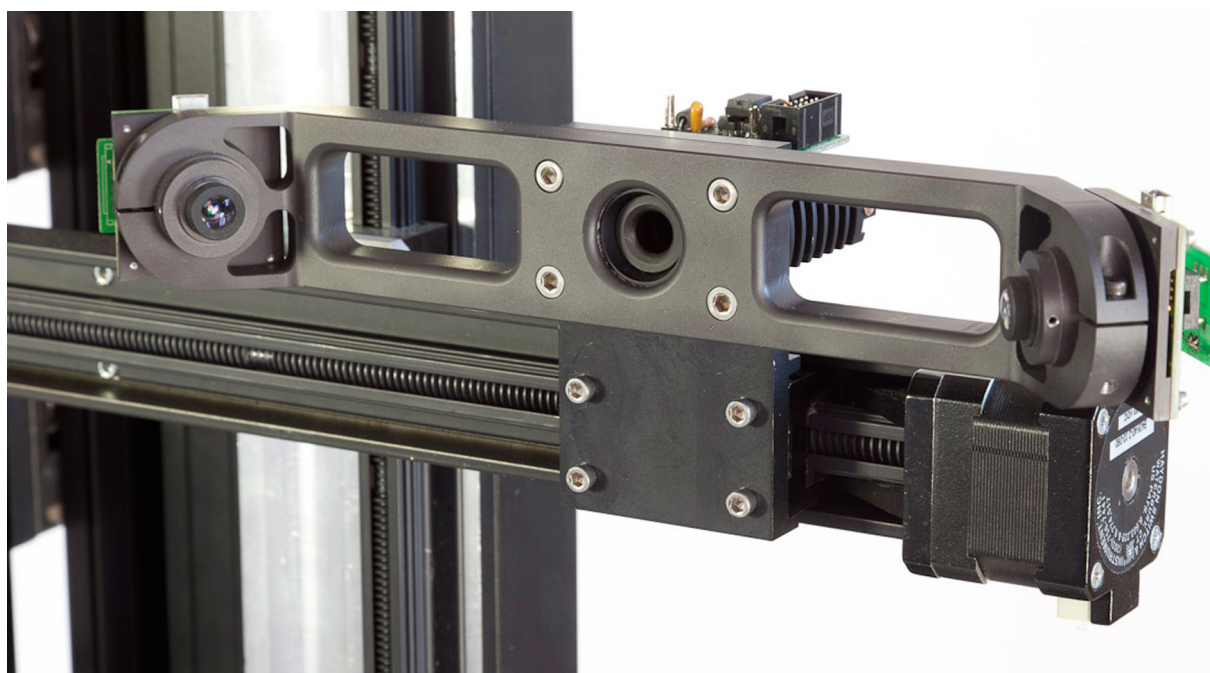


Figura 9. Escáner 3D Lucida, concebido por Manuel Franquelo.

Otra de las ventajas del sistema Lucida es que almacena la información 3D en forma de archivos de vídeo en blanco y negro en su estado *raw* (sin procesar ni comprimir). Esto permitirá reprocesar la información en el futuro, quizás a mayor resolución o mediante algoritmos más avanzados, lo que supone una aproximación radical que refleja un profundo conocimiento de las necesidades del mundo de la conservación de patrimonio.

Documentación de sitios frágiles

Una vez desarrollado el sistema Lucida, ha dado comienzo la siguiente fase del trabajo de Factum Arte en Egipto: la digitalización en 3D y color de la tumba de Seti I. Se trata de un proyecto de mayor alcance que el de Tutankamón, debido a la complejidad y dimensiones del monumento. El objetivo es obtener la información en alta resolución necesaria para documentar el estado actual de conservación de la tumba, así como para fabricar un facsímil a escala real para ser instalado en el Valle de los Reyes.

La tumba de Seti I, uno de los espacios arqueológicos más importantes del mundo, ha permanecido durante décadas cerrada al público por razones de conservación. El facsímil dará a conocer el monumento y permitirá su contemplación sin renunciar a su preservación. La digitalización de la tumba se inició en mayo de 2016 y está previsto que continúe durante varios meses. Un equipo de Factum Arte, coordinado por la arquitecta y egiptóloga Aliaa Ismail, se encargará de llevar a cabo el escaneado en 3D y color de los muros, empleando para ello diferentes sistemas complementarios (figura 10).



Figura 10. Escáner 3D Lucida digitalizando el relieve en la tumba de Seti I en 2016.

El escáner 3D Lucida se está utilizando para obtener información del relieve de los muros en alta resolución. Para aquellas zonas que no son accesibles por este sistema, como la parte superior e inferior de los muros, las esquinas o los techos, se está utilizando fotogrametría. La fotogrametría es la técnica de obtención de información 3D a partir de múltiples fotografías. Para obtener un escaneado preciso del espacio interior de la tumba se ha utilizado un escáner Lidar. Por último, la información de color de los muros se está digitalizando mediante fotografía panorámica (figura 11).

Este conjunto de datos, obtenido mediante diferentes sistemas, está siendo unificado en un solo modelo digital con información de 3D y color. Igual que en el trabajo de digitalización de la tumba de Tutankamón, la información 3D en alta resolución permitirá analizar el relieve de los muros con todo detalle y sin la capa de color. El tratamiento y archivo de los datos, cuyos derechos y explotación pertenecen al Gobierno egipcio, está siendo administrado por la Fundación Factum (figura 12).

Digitalización de fragmentos

Además del escaneado de la tumba de Seti I, el proyecto prevé la digitalización de importantes elementos que originalmente formaron parte de la tumba y que hoy se encuentran distribuidos



Figura 11. Gabriel Scarpa, de *Factum Arte*, fotografiando la Tumba de Seti I en 2016.



Figura 12. *Render de la información 3D obtenida con el escáner 3D Lucida.*

en museos de todo el mundo. Esto permitirá una reconstrucción del monumento más cercana a su estado original, mediante la inserción digital de estos fragmentos en el modelo virtual general.

En marzo de 2016 se llevó a cabo la digitalización del sarcófago de Seti I, una pieza de grandes dimensiones realizada en alabastro, que se encuentra en el John Soane's Museum de Londres. La superficie semitranslúcida del sarcófago no recomendaba el uso de sistemas de escaneado láser como Lucida, por lo que se empleó un sistema de fotogrametría adaptado específicamente para este trabajo.

Se tomaron más de 4500 fotografías de 50 Mp que, una vez procesadas, han dado lugar a un modelo 3D que facilitará un estudio en profundidad de la superficie de esta pieza. La reproducción del sarcófago se realizará en alabastro, y formará parte del facsímil de la tumba de Seti I cuando esta se instale en el Valle de los Reyes (figura 13).

Además del sarcófago, se está llevando a cabo el escaneado de varios fragmentos de relieve que fueron arrancados de los muros de la tumba y que hoy se encuentran formando parte de colecciones en múltiples localizaciones. Se han escaneado varios fragmentos pequeños que se encuentran en el Museum of Fine Arts de Boston y en los próximos meses se digitalizarán relieves en el Musée du Louvre de París, Museo Archeologico de Florencia o Staatliche Museen de Berlín, entre otros.



Figura 13. Sarcófago de Seti I en el John Soane's Museum de Londres.

Transferencia tecnológica

Otro de los aspectos relevantes de este proyecto es la participación local en el proceso de digitalización de las tumbas del Valle de los Reyes, lo que desde el principio ha sido una parte esencial de la iniciativa promovida por la Fundación Factum. La transferencia de tecnología y conocimientos a Luxor es esencial para hacer posible que proyectos como este sean sostenibles en el tiempo.

Para llevar a cabo este objetivo, en 2016 la Fundación Factum ha restaurado Stoppelaere House, uno de los edificios más representativos de construcción en ladrillo de adobe del arquitecto Hassan Fathy. El edificio, situado en una posición privilegiada a la entrada del Valle de los Reyes, se convertirá en un centro de formación en tecnología digital, equipado con la última tecnología de escaneo 3D y color en alta resolución (figura 14).

El centro hará posible formar a jóvenes de Luxor, principalmente del West Bank, en el uso de la tecnología digital para la documentación de su patrimonio artístico y cultural. La implicación de las autoridades y la comunidad local es esencial para la continuidad de un proyecto como este. Este proyecto está siendo promovido por la Fundación Factum, que tiene como objetivo el desarrollo y aplicación de tecnología digital para la conservación del patrimonio. Los recursos económicos necesarios para hacerlo posible han sido obtenidos fuera de Egipto mediante donaciones privadas.

Es responsabilidad de todos proteger nuestro patrimonio cultural para que pueda transmitirse de la forma más inalterada posible a las futuras generaciones, y la tecnología digital es un aliado esencial para conseguir este objetivo. La documentación del estado de conservación de un monumento, sobre todo si se realiza en alta resolución, permitirá seguir aprendiendo de él incluso en caso de que se deteriore o se pierda definitivamente.



Figura 14. Stoppelaere House, el nuevo centro de formación en tecnología digital.

Es urgente que los responsables de velar por la protección del patrimonio comprendan el valor de digitalizar una obra de arte o un sitio arqueológico antes de cualquier intervención o restauración. La realización de facsímiles es una respuesta a la necesidad de hacer coexistir el turismo cultural con la conservación de los monumentos. Sin embargo, el principal valor radica en la información digital obtenida y en su capacidad para generar conocimiento compartido (figura 15).



Figura 15. Aliaa Ismail, coordinadora del proyecto de digitalización de Seti I.

RPAS o drones aplicados al patrimonio cultural: de la documentación geométrica a las imágenes multispectrales

Jorge Angás Pajas

3DScanner. *Spin Off* Universidad de Zaragoza. Grupo de Investigación Primeros Pobladores del Valle del Ebro
j.angas@3dscanner.es

Paula Uribe Agudo

Departamento de Prehistoria, Historia Antigua y Arqueología. Universidad de Salamanca
uribe@usal.es

Resumen: Durante los últimos años, diferentes tecnologías han emergido haciendo posible la obtención de información métrica y gráfica cada vez más rápida, precisa y de bajo coste para la documentación e investigación del patrimonio cultural. Los denominados RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) o drones han contribuido en este sentido, permitiendo obtener imágenes con una alta resolución espacial. A este hecho se suma un avance análogo de software, que proporciona un vasto conjunto de posibilidades fotogramétricas para reconstrucciones geométricas y de teledetección mediante diferentes análisis espectrales. Además, la evolución de los sensores comerciales adaptados a estos sistemas, sobre todo, relacionados con el campo de la agricultura de precisión, permiten utilizar cámaras multispectrales que abarcan las longitudes de onda del visible, del infrarrojo cercano o del térmico. Todas ellas son similares a las proporcionadas por las imágenes de satélite, pero con una clara ventaja de resolución, inmediatez y, por ende, versatilidad. Fiel reflejo de este conjunto de nuevas herramientas son las publicaciones científicas que analizan estas aplicaciones en el patrimonio cultural, por citar algunos ejemplos: Uribe *et al.* (2015), Farjas *et al.* (2015), Campana (2011, 2017) o Verhoeven *et al.* (2013).

Palabras clave: Dron, patrimonio cultural, fotogrametría SfM, imágenes multispectrales, teledetección.

Abstract: In recent years, different technologies have emerged and have made the obtaining of metric and graphical information increasingly faster, more accurate and cheaper for documentation and research of Cultural Heritage. Remotely Piloted Aircraft System (RPAS), or drones, have contributed in this way, allowing the obtaining of images with a high spatial resolution that, in addition to the analogue advancement of software, offer a vast set of photogrammetric possibilities for geometric reconstructions and of remote sensing via different spectral analyses. In addition, the evolution of commercial sensors adapted to these systems, especially related to the field of precision agriculture, allow the use of multispectral cameras that cover visible, NIR and thermal wavelengths at all lengths similar to those provided by satellite images but with a clear advantage in resolution, in immediacy and, therefore, in versatility. A comprehensive reflection of the application of these new tools are the scientific publications that analyse these applications in Cultural Heritage, to cite some examples: Uribe *et al.* (2015), Farjas *et al.* (2015), Campana (2011, 2017) or Verhoeven *et al.* (2013).

Keywords: Drone, Cultural Heritage, SfM photogrammetry, multispectral images, remote sensing.

1. Introducción: la relación entre la tecnología y la documentación del patrimonio

La evolución en la documentación del patrimonio cultural ha sabido aprovechar cada uno de los cambios tecnológicos surgidos a lo largo de la Historia en beneficio de un mejor registro documental. Debemos tener en cuenta que la heterogeneidad en las diferentes clasificaciones patrimoniales determina una diversificación tanto en las técnicas empleadas en la digitalización como entre el conjunto de profesionales encargados en la documentación de cada uno de los aspectos relevantes para cada disciplina. De hecho, esta pluralidad del patrimonio está definida por su contenido semántico, por el método¹ y por las técnicas de documentación y su propia difusión. Se convierte, de esta manera, en uno de los campos que más dificultades presenta para su registro, debido a su multiplicidad y sus características (materiales, formas, texturas, dimensiones, antigüedad, localización, fragilidad, etc.). Si atendemos al uso que se ha dado a la gestión del patrimonio como «motor de masas», ha incentivado una constante búsqueda y adaptación para relacionar las nuevas técnicas de documentación como herramienta de difusión social (Ubieto, 2007: 25-26). Este proceso ha sido uno de los factores que ha propiciado durante el último decenio que surjan una gran variedad de técnicas de documentación tridimensionales que han sido aplicadas, mediante una metodología combinada, en la documentación y difusión del patrimonio cultural. Este carácter dual ha permitido un equilibrio en el planteamiento de los proyectos donde se ha podido extraer información científica, conjuntamente con otro tipo de resultados con fines divulgativos.

Para analizar la madurez tecnológica de una determinada herramienta podemos recurrir al denominado ciclo de sobreexpectación de las actuales TIC (tecnologías de la información y la comunicación). El término sobreexpectación *hype cycle* fue acuñado por la consultora analista Gartner² a mitad de los años noventa del pasado siglo, coincidiendo con el inicio tecnológico de Internet. Actualmente constituye una de las gráficas de referencia para medir el riesgo de inversión mediante la relación de dos vectores: expectativas y tiempo. Así se consigue analizar el ciclo de sobreexpectación de una determinada tecnología de la información y la comunicación (TIC). Las diversas fases que componen el ciclo de sobreexpectación que Gartner marca en una determinada tecnología se dividen en: lanzamiento o presentación tecnológica, pico de expectativas sobredimensionadas, abismo de desilusión, rampa de consolidación y, por último, meseta de productividad. Gartner situó en el verano de 2016 a los vehículos autónomos –donde enmarca en una categoría a los drones– dentro del denominado «abismo de la desilusión», augurando un recorrido todavía de 10 años para garantizar una productividad consolidada. Sin embargo, se trata de una generalización que es necesario puntualizar, puesto que los ritmos de aplicación y crecimiento son diferentes en cada disciplina.

En la actualidad, el avance tecnológico basado en el empleo de drones puede definirse como una síntesis de las técnicas más significativas empleadas en los últimos ciento cincuenta años en la documentación del patrimonio. Estas transformaciones se pueden dividir en cuatro grandes bloques: la invención y desarrollo de la fotografía, la incorporación de la aviación, la era de la computación y el desarrollo de instrumentos óptico-electrónicos. Desde cada una de estas técnicas se han ido desprendiendo otro tipo de progresos tecnológicos, aunque siempre confluyen en un mismo punto, sobre todo a partir de los años setenta del siglo xx, con los análisis computacionales. Igualmente todas estas técnicas fueron rápidamente aprovechadas

¹ Adoptamos la definición de Gutiérrez (2001: 18) aplicada a la documentación del patrimonio cultural cuando hace una aclaración entre método y técnica proponiendo que «es necesario advertir que pese a lo usual de la expresión “método arqueológico”, esta resulta en rigor conceptualmente impropia puesto que el método científico es uno y la expresión designa en realidad el conjunto de técnicas y procedimientos específicos de que se sirve la Arqueología».

² Disponible en: <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp> [Consulta: 29 de septiembre de 2016].

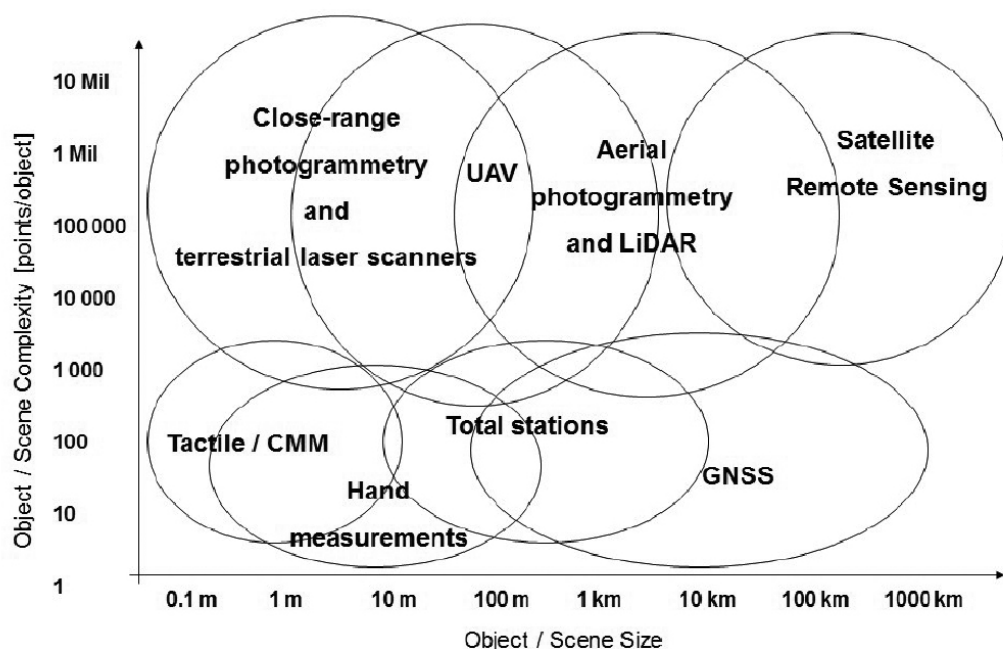


Figura 1. Diagrama de las diferentes técnicas geomáticas para el registro tridimensional teniendo en cuenta dos vectores: el tamaño del objeto y la complejidad del modelo, según Remondino (2014: 14).

para la representación del patrimonio, generalizándose el uso de nuevos métodos de trabajo. Este hecho ha redundado incluso en la utilización de herramientas y técnicas de bajo coste, que junto a un elenco de programas *open source*, constituyen una alternativa para todas las necesidades en la documentación del patrimonio³.

2. Antecedentes historiográficos en la documentación aérea del patrimonio cultural

Desde la presentación de la fotografía como una nueva técnica ligada como símbolo de progreso, en el discurso pronunciado por François Arago en la Academia de las Ciencias de París de 1839, insistiendo en su utilidad inmediata, exactitud y rapidez, discurrirán varios decenios con constantes mejoras técnicas hasta su plena aplicación al mundo de la arqueología (González, 2007: 102). El uso de la fotografía como fuente documental en la arqueología fue generalizándose desde 1860, sustituyendo a los medios de representación gráficos habituales (dibujos, grabados, calcos, vaciados, etc.), proporcionando varias colecciones, como la del arqueólogo calaceitano Juan Cabré, de 5558 negativos en placas de vidrio y de nitrato de celulosa que constituyen un documento excepcional tanto arqueológico, metodológico como etnográfico⁴.

El uso de esta técnica fue cada vez más utilizado, con pequeños avances, como el invento de Richard Madox de la «placa seca» que permitía retrasar el revelado. Además, propició una mejor nitidez pudiéndose hacer copias ilimitadas de las placas emulsionadas. Posterior-

³ En la arqueología, por ejemplo, existe desde hace aproximadamente diez años una tendencia vinculada al *workshop* y posterior congreso ArcheoFOSS 2006 centrado en «Free, Libre and Open Source Software e Open Format nei processi di ricerca archeologica». Toda esta nueva tendencia surge como respuesta al aumento tecnológico, donde en muchas ocasiones resulta complicado sufragar diferentes tipos de instrumentos tecnológicos.

⁴ En 1991 el archivo Cabré fue donado por la familia del arqueólogo Juan Cabré al Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE). Disponible en: <http://ipce.mcu.es/documentacion/fototeca/fondos/cabre.html> [consulta: 29 de septiembre de 2016].

mente, la llegada de Kodak, fue catalogada de «democratización» de la fotografía hacia 1890 (Nir, 1985: 260) y de «revolución» en todos los sentidos como técnica fácil y barata, abierta a todo el mundo con el eslogan de 1888 «You press the button and we do the rest» (González, 2007: 37)⁵. Sin duda, a partir de este momento se comenzó a ver la fotografía como una técnica adecuada para la documentación de los hallazgos científicos (Morata, 2010: 5) que ofrecía a la investigación arqueológica eficacia, exactitud y rentabilidad.

Algunos autores (Musson, 2005: 18) atribuyen la primera imagen aérea con objetivos arqueológicos⁶ al alemán Franz Stolze –precursor de la marca flotante para apreciar la profundidad en las imágenes–, posiblemente por su ayuda en la realización de varios planos fotogramétricos de Persépolis (Stolze, 1882: 149). En Italia, el primero que intuyó los beneficios que esta técnica podía ofrecer a la arqueología fue Giacomo Boni, quien, con ocasión de las excavaciones del foro romano en 1899, realiza personalmente una serie de fotos desde un globo cautivo.

En los años sucesivos asistimos a la intensificación de esta actividad donde, según Campana (2011: 18), se hace evidente la principal característica de la fotografía: el valor histórico de un

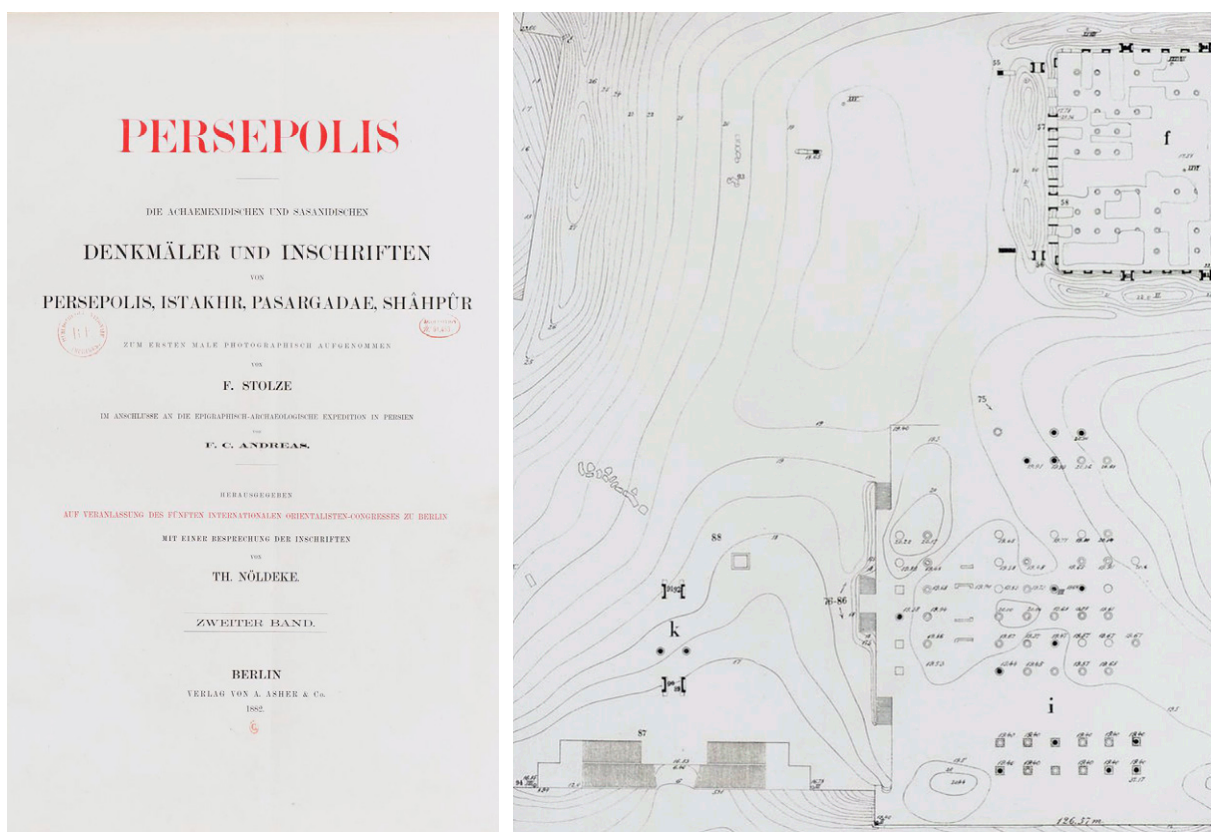


Figura 2. Primeros estudios monográficos sobre Persépolis, destacando la documentación fotográfica y el conjunto de plantas topográficas realizadas por Franz Stolze (1882) como precursor del uso de las fotografías con fines fotogramétricos.

⁵ Destacamos la monografía de la doctora González Reyero (2007): *La fotografía en la arqueología española*, sobre los estudios de las técnicas fotográficas aplicadas a la documentación del patrimonio entre 1860-1960. Además de la exhaustiva evolución de la fotografía arqueológica como técnica de representación gráfica en los siglos XIX y XX en España, la autora aborda de igual modo un análisis historiográfico del contexto europeo e imperialismo colonial de la documentación fotográfica en Francia, Alemania, Gran Bretaña e Italia.

⁶ Sobre los vuelos realizados en el siglo XIX utilizando un globo aerostático y cámaras fotográficas todavía sin una finalidad arqueológica, *vid.* Campana (2011: 17).

documento objetivo. Este primer desarrollo teórico, unido a la gran disponibilidad del material fotográfico con objetivos bélicos, determinó un salto cualitativo en la investigación arqueológica. Sin embargo, es en el periodo de entreguerras cuando asistimos a la definición de los fundamentos teóricos de la fotografía aérea arqueológica de la mano de Antoine Poidebard y Osbert Guy Crawford. Consecuentemente viene definido el proceso de formación de las *crop marks* y *soil marks*⁷. De esta forma se supera la fase de la mera visualización para el desarrollo de la etapa deductiva con el reconocimiento e interpretación de los restos arqueológicos soterrados por la traza anómala que causan en su ambiente circundante (Campana, 2011: 19).

Asimismo, también durante la Segunda Guerra Mundial y debido a la necesidad de individuar objetos mimetizados con el suelo o escondidos, se desarrollan técnicas alternativas como las primeras tomas de fotografías térmicas y la adquisición de datos radar (Mantovani y Marcolongo, 1992: 16-19).

En 1945, como parte del desarrollo de esta técnica, se crea el *Cambridge University Committee for Aerial Archaeology* (CUCAP) para la adquisición de fotografía aérea. Con este organismo se desarrolló la técnica de lectura e interpretación de las imágenes y se creó el primer archivo aéreo fotográfico arqueológico que hoy cuenta con 500000 fotogramas (Downey, 1980: 1-21)⁸.

Tras este hito, hasta los años noventa, muchos organismos públicos y universidades se preocuparon por tener una colección de fotografías aéreas con la intención de poner en valor los bienes arqueológicos y crear una estructura operativa en el terreno. De esta forma surgen determinados laboratorios especializados en este campo en Italia, Francia, Alemania o Gran Bretaña, siendo España la gran ausente dentro de esta especialidad.

El uso de ultraligeros en la documentación del patrimonio fue una constante prácticamente hasta el año 2009, cuando se empieza a generalizar el empleo de drones y, en consecuencia, el abaratamiento en la captura de imágenes aéreas. Hasta entonces era frecuente utilizar ultraligeros tanto para la documentación directa como para la prospección e interpretación de marcas de crecimiento (*soilmarks*, *cropmarks*) empleando, según las diferentes condiciones fenológicas y ambientales en cada época del año, diferentes técnicas de luz rasante.

Sobre el uso de este conjunto de técnicas, citaremos, a modo de ejemplo, la investigación realizada en 2003 en el territorio noroccidental de la ciudad etrusca de Vulci (Angas, 2005: 65-94). Los trabajos realizados se llevaron a cabo mediante un sistema clásico de prospección aérea, con un avión ultraligero Partenavia P 66. De este modo se hizo una documentación intensiva, concentrándose en la zona del valle del Albegna –considerado como la zona bisagra entre la Etruria septentrional y meridional– con el fin de prospeccionar el área arqueológica del territorio noroccidental vulcente. La figura 3 corresponde a la localidad de Marsiliana⁹, donde

⁷ Recordemos que el crecimiento diferencial entre la vegetación de una misma zona provoca la aparición de estas marcas solo visibles desde el aire. En este caso, el desarrollo diferencial de la vegetación está inducido por la presencia de restos soterrados en el suelo que impiden un comportamiento fenológico similar a aquellas plantas que crecen sobre muros o pozos. En consecuencia, estas «marcas de cosecha» o «marcas del suelo» han ayudado a los arqueólogos a identificar los restos arqueológicos todavía enterrados e invisibles en superficie.

⁸ Disponible en: <http://www.geog.cam.ac.uk/cucap/about/> [consulta: 29 de septiembre de 2016].

⁹ Fotografías de noviembre de 2003 de la zona del *Magazzino* de Marsiliana D'Albegna (Italia) y de la carretera S.P. 63 que se aleja hacia Capalbio en dirección suroeste. En esta imagen general se pueden contemplar las diferentes zonas de la intervención arqueológica de la campaña de 2003 (dirigida por Andrea Zifferero), con el límite de la necrópolis de *Fontingrande* y la excavación en el *Podere 145* (figura 3). En la zona de *Perazzeta* se aprecian claramente diversas tonalidades más claras como consecuencia de los bloques de tufo blanco que describe Antonio Minto (figuras 3 y 4), los cuales servían para delimitar los círculos funerarios. En la zona de la *Banditella* se propone una hipótesis reconstructiva del emplazamiento de la antigua necrópolis de la Banditella mediante la superposición a escala de la planta que dibuja Antonio Minto entre 1909 y 1919. Para ello se ha trazado un dibujo planimétrico previo utilizando la planta base de Minto (Angás, 2005).



Figura 3. Fotografía del área arqueológica (este-oeste) en Marsiliana D'Albegna (Italia) en 2003, donde se puede, apreciar las diferencias de coloración de los túmulos etruscos en la necrópolis de Perazzeta y la Banditella (Marsiliana D'Albegna, Italia).



Figura 4. Fotografía tomada en dirección oeste-este apreciándose al fondo el castillo Corsini y el río Albegna junto con el núcleo de Marsiliana D'Albegna (Italia). Adviértase la propuesta marcada con una línea blanca discontinua sobre las coloraciones circulares del terreno. Imagen modificada sobre original (Angás, 2005: 82).

se pueden distinguir varios círculos funerarios con una tonalidad más clara, pertenecientes, muy posiblemente, a la necrópolis de la Banditella y Perazzeta que el arqueólogo Antonio Minto excavó en los primeros años del siglo xx.

3. Aplicaciones métricas y gráficas derivadas del empleo de drones en la documentación

El desarrollo surgido, sobre todo, desde el año 2009 con la proliferación de múltiples sistemas de drones, tanto del tipo multirrotor como de ala fija, ha permitido un avance paralelo, igualmente necesario y obligado, respecto al software y sus aplicaciones. Las diferencias entre ambas tipologías, más comunes de drones, son claras: los multirrotores permiten un aterrizaje y despegue vertical y con ello un control prácticamente a cualquier altura. Este factor permite, generalmente, la obtención de una mejor resolución espacial. Por el contrario, suelen ser aeronaves con una menor autonomía que las alas fijas y con ello cubren una menor extensión. Los sistemas de ala fija, en cambio, proporcionan mayor superficie de actuación, debido fundamentalmente a su autonomía, utilizándose en actividades generalmente relacionadas con la agricultura de precisión, cartografía y topografía. El organismo que se encarga de la regulación de operaciones con drones de hasta 150 kg en España es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) del Ministerio de Fomento¹⁰.

Por otro lado, si atendemos a los avances de los componentes eléctricos y electrónicos debemos tener en cuenta, fundamentalmente, la utilización de baterías de polímeros de litio (Lipo), que ofrecen una buena relación entre su peso y la autonomía que proporcionan, y el uso y abaratamiento de los autopilotos que integran un sistema de navegación GNSS, giróscopos y acelerómetros. Con ello se resuelven técnicamente los principios básicos de este tipo de aeronaves: mejora de la autonomía, vuelo asistido mediante coordenadas absolutas, rotación y orientación de la aeronave.

Generalmente el posicionamiento de este tipo de aeronaves está establecido por sistemas GNSS con una precisión de aproximadamente entre 2 a 5 metros. Este factor ligado a actividades topográficas y cartográficas hace necesario un apoyo fotogramétrico de puntos sobre el terreno, adquiridos con otro tipo de instrumentos topográficos (estaciones totales o sistemas GNSS RTK) con una precisión centimétrica. Actualmente han surgido soluciones de aeronaves tanto del tipo multirrotor como de ala fija que ya integran este otro tipo de sensores GNSS RTK y PPK¹¹. Este factor proporciona un claro avance, ya que evita la colocación de puntos de control sobre el terreno, permitiendo una clara mejora cuantitativa en tiempo de trabajo y acceso a zonas inaccesibles por tierra. Asimismo, con este tipo de drones se pueden obtener precisiones centimétricas en tiempo real mediante el empleo de diferentes tipos de soluciones:

1. Enlace directo con una estación de tierra GNSS RTK.
2. Conexión de telefonía móvil enlazada a una red de geodesia activa.
3. Posproceso de archivos RINEX con una estación de tierra GNSS RTK.
4. Almacenamiento directo en la aeronave de observaciones brutas y posproceso mediante el sistema PPK.

¹⁰ Disponible en: http://www.seguridadaerea.gob.es/lang_castellano/cias_empresas/trabajos/rpas/default.aspx [consulta: 29 de septiembre de 2016].

¹¹ *Global Navigation Satellite System RTK (Real Time Kinematic) y PPK (Post-Processing Kinematic).*



Figura 5. Imagen de la izquierda: sistema de dron integrado del tipo multirrotor con autopiloto *open source* ArduPilot en la fortaleza de Rustaq (Sultanato de Omán). Imagen de la derecha: dron comercial de ala fija de senseFly con sistema integrado GNSS RTK-PPK.

Estos avances de hardware han contribuido, igualmente, a una de las tendencias sociales que mayor implantación han tenido en la sociedad actual desde el cambio de milenio: la democratización tecnológica. Así, uno de los conceptos básicos que lleva implícito este término es la propia accesibilidad de una determinada tecnología, permitiendo una autogestión con fines profesionales de cada uno de los procesos de trabajo.

Posteriormente, como respuesta al avance progresivo de los drones, han surgido, de un modo paralelo, tipos de sensores de muy poco peso para poder integrar en cada una de estas plataformas, que abarcan diferentes longitudes de onda, desde el visible (VIS), hasta el infrarrojo cercano (NIR) y el térmico. De esta manera las posibilidades de aplicación que ofrece el empleo de todas estas longitudes de onda contribuyen a una amplia longitud espectral y a una mejor resolución espacial. Sobre todo si lo comparamos, por ejemplo, con imágenes aéreas convencionales, que podemos obtener del PNOA¹², o la información proporcionada por los satélites en la teledetección. Igualmente, el uso de esta tecnología está aportando unos resultados operativos en otro tipo de disciplinas, como la agricultura de precisión y la cartografía.

La información derivada de este tipo de herramientas en el patrimonio cultural podemos sintetizarla en tres bloques: 1) desde la toma de imágenes aéreas (VIS) como documentación meramente visual que nos proporciona una mejor comprensión espacial del espacio patrimonial; 2) con el mismo tipo de imágenes (VIS) nos permite su utilización para reconstrucciones tridimensionales mediante correlación automática de imágenes por técnicas fotogramétricas, y 3) el uso de otro tipo de sensores multiespectrales (VIS, NIR y térmico) los cuales recogen una longitud de onda concreta, que podemos separar posteriormente por canales e interpretar con herramientas de teledetección (composiciones de falso color, filtros, análisis de componentes principales, índices de vegetación, etc.), aportando nueva información a la prospección aérea.

El resultado final que nos ofrece cada uno de estos bloques al patrimonio cultural abarca desde una simple toma fotográfica hasta la generación de una ortofoto, un modelo tridimensional (DSM y DTM según algoritmos de filtrado) o un análisis de los diferentes canales que podemos interpretar mediante técnicas de teledetección. Todas ellas al servicio del conjunto interdisciplinar de profesionales que se dedican a la documentación del patrimonio cultural.

¹² Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) con una resolución de entre 25 y 50 centímetros. Disponible en: <http://pnoa.ign.es/> [Consulta: 29 de septiembre de 2016].

Documentación geométrica

El avance del software basado en técnicas fotogramétricas *Structure from Motion* (SfM) permite importar una colección de imágenes en un proceso de correlación automática, generando nubes de puntos densas (x, y, z , RGB). Este tipo de programas ha propiciado un auge significativo en el uso de estas técnicas aéreas –mediante el empleo de drones–, y terrestres –sobre todo en arquitectura y bienes muebles– en el patrimonio cultural para realizar reconstrucciones tridimensionales. Hoy en día existe un buen número de ejemplos de software de este tipo, muchos de ellos comerciales con algunas alternativas gratuitas y *open source* (*vid. supra*).

Para obtener una correcta documentación geométrica mediante el empleo de estas técnicas fotogramétricas resulta necesario, en primer lugar, realizar una estrategia en la planificación del vuelo teniendo en cuenta el GSD (*Ground Sample Distance*) que queremos obtener. De esta manera, si partimos de un software de planificación automático nos calculará, dependiendo del tipo de sensor y su longitud focal, el solape longitudinal y transversal necesario que debemos tener entre imágenes, junto con la altura de vuelo para obtener esa resolución. Existe otro tipo de programas de planificación, que no están plenamente adaptados a cada aeronave, donde únicamente calculan *waypoints* y altura de vuelo, por lo que resulta necesario establecer unos cálculos de tamaño de píxel, velocidad y solape que introduciremos posteriormente en el programa teniendo en cuenta las características del tipo de sensor que utilicemos¹³. Además, resulta necesario el cálculo de varios parámetros, con los que determinaremos la calidad final del modelo tridimensional y de la ortofoto. Estos factores son: altura de vuelo, resolución de la cámara, longitud focal del objetivo y cálculo del solape necesario entre imágenes. El conjunto de todos estos parámetros sirven para calcular la resolución del píxel y la precisión de la ortofoto.

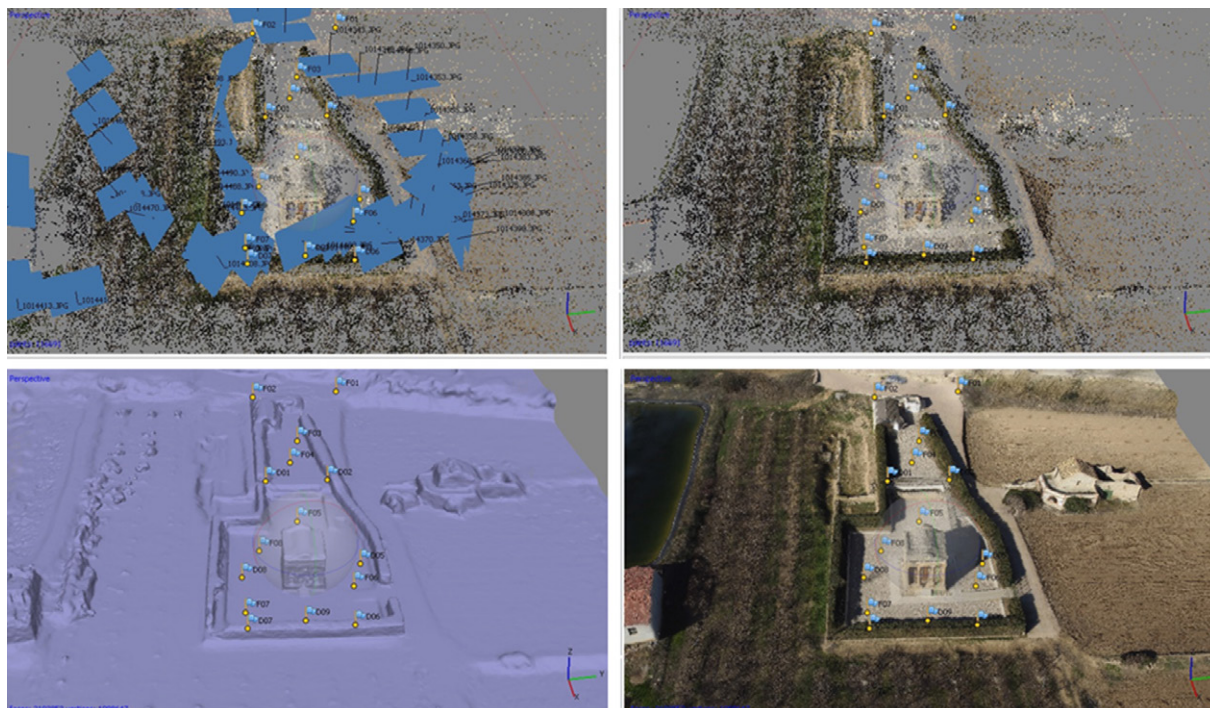


Figura 6. Proceso de reconstrucción tridimensional por correlación automática de imágenes aéreas (orientación de las imágenes, generación de nube de puntos densa, mallado y aplicación de textura) del mausoleo romano de Fabara (Zaragoza).

¹³ Véase, a modo de ejemplo, una hoja de cálculo donde podremos introducir los parámetros requeridos para posteriormente introducirlos en el software de planificación de vuelo. Disponible en: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-Calculator#gsc.tab=0>. [Consulta: 29 de septiembre de 2016].

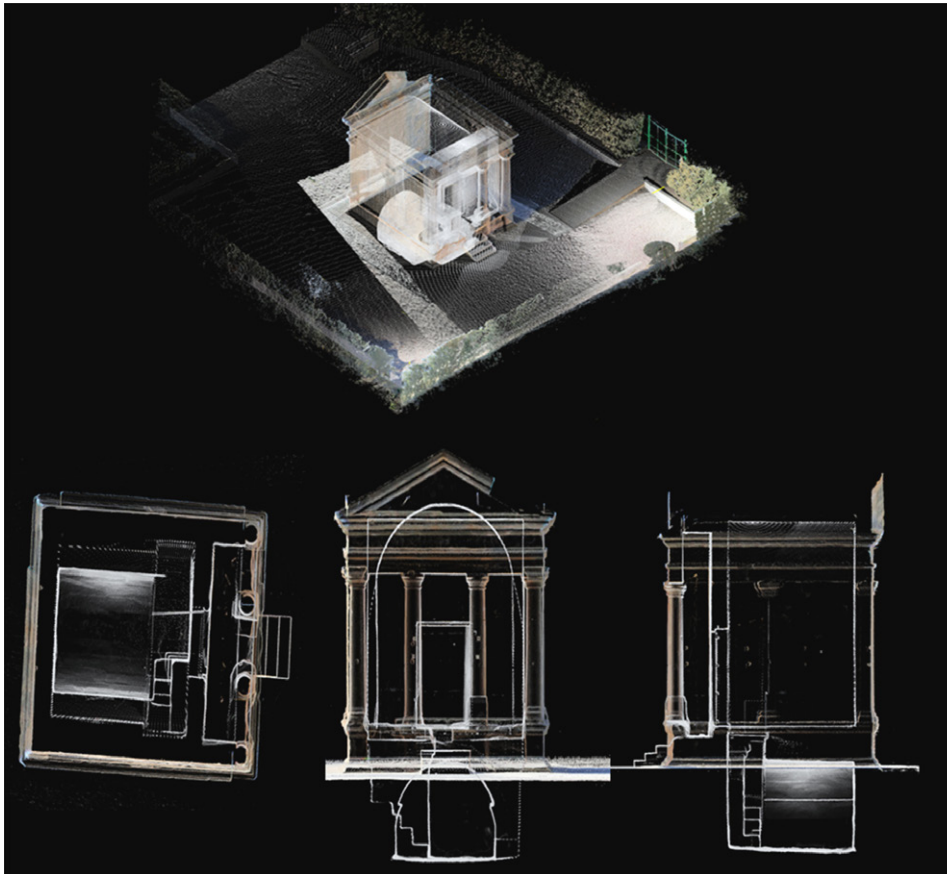


Figura 7. Documentación geométrica combinada con un escáner láser 3D de diferencia de fase para la arquitectura interior y mediante un dron en la zona exterior en el mausoleo romano de Fabara (Zaragoza). Nube de puntos: vista isométrica, planta, alzado y sección.

4. La teledetección como herramienta de investigación en el patrimonio arqueológico

La aplicación de la teledetección es otra de las ciencias que ha tenido un gran protagonismo en el análisis científico de la arqueología del paisaje. Su definición quedaría resumida como la ciencia que estudia el conjunto de técnicas de adquisición, elaboración e interpretación de objetos sin entrar en contacto directo con los mismos. En consecuencia, siempre señala un ámbito multidisciplinar y en la frontera del conocimiento, donde confluyen campos de aplicación como las ciencias de la tierra, la agricultura, la ordenación del territorio, la biología, etc. (Campana, 2011: 12).

Aunque es una ciencia relativamente joven y muy dependiente del estado de desarrollo tecnológico existente, aplicada al campo que nos ocupa, esto es, la Arqueología¹⁴, coincide con el desarrollo de la fotografía aérea (Musson *et al.*, 2005, 2013) y posteriormente de las plataformas satelitales¹⁵.

¹⁴ Destacamos otro tipo de estudios precedentes que contribuyeron a la conexión y posibilidades de la teledetección con la arqueología, como Palacios y Martín-Bueno (2004: 331-361), analizando las posibilidades y aplicaciones de la teledetección activa con el radar de apertura sintética (SAR) en la arqueología.

¹⁵ Las herramientas de teledetección geofísicas (georradar, electromagnéticas, etc.) no forman parte de nuestro análisis; sin embargo, su uso se complementaría perfectamente como técnica de contrastación intensiva de los restos previamente individualizados en campo.

Asimismo, el uso de drones supone, en primer lugar, el abaratamiento de costes. Comprar una imagen de satélite comercial o realizar un vuelo tripulado incrementa ampliamente el precio del trabajo de campo. En segundo lugar, se puede realizar una captura de datos personalizada, donde el investigador define la resolución del píxel que quiere para su proyecto, así como obtener diversos productos cartográficos: planos, modelos 3D, modelos digitales del terreno y de elevación. De la misma forma, la incorporación de sensores multispectrales permite visualizar elementos que el ojo humano (longitud de onda del visible) no logra ver. Obviamente, todo ello conlleva una nueva serie de problemas como la ortorrectificación, el procesamiento o la obtención de las imágenes.

La teledetección en el campo arqueológico permite analizar grandes extensiones con el fin de resolver diferentes problemáticas que se plantean actualmente en el estudio del patrimonio arqueológico. Muchos de estos problemas surgen ante la incapacidad de llevar a cabo excavaciones arqueológicas; de esta manera se plantea la aplicación sobre el uso de imágenes multispectrales realizadas a baja altura, mediante el uso de RPAS o drones, con la finalidad de investigar y delimitar los restos que permanecen todavía soterrados.

Para el tratamiento de las imágenes multispectrales en Arqueología se procesan generalmente los índices de vegetación que reflejan la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación. Estos consisten en la creación de ratios o cocientes, píxel a píxel, entre los niveles digitales de dos o más bandas de la imagen (Chuvieco, 2010: 337).

Obviamente la vegetación, bajo la que subyacen los restos arqueológicos, presenta una variación de crecimiento dependiendo de si está creciendo sobre estructuras enterradas o no (*crop marks* o *soil marks*). Es decir, una planta que crece en una parcela donde existen estructuras soterradas (por ejemplo, un muro) presentará un comportamiento diferente a una planta que crece en el mismo terreno en una zona sin restos arqueológicos.

Desde el año 2009 se está desarrollando una investigación en 15 yacimientos arqueológicos, distribuidos en el valle medio del Ebro, con el objetivo de establecer un análisis sistemático en diferentes contextos cronológicos mediante el empleo de drones con diversos tipos de sensores de espectro visible y multispectral (VIS, NIR, térmico). La finalidad de este estudio, que aglutina diferentes instituciones (Universidad de Salamanca, Universidad de Zaragoza, Go-

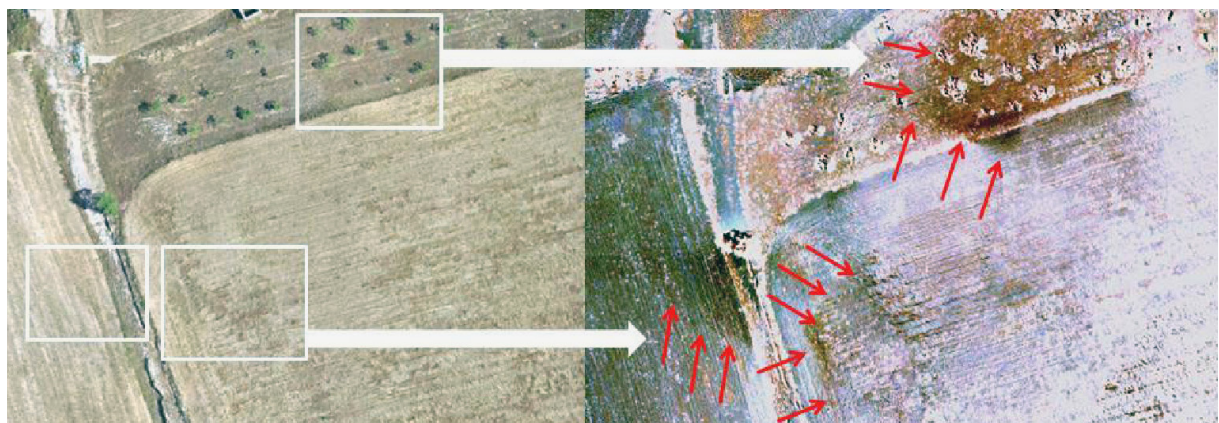


Figura 8. Resultado del tratamiento digital de las imágenes (creación de neocanales R: NDVI_6; G: NDVI_5; B: NDVI_4 y realce lineal del histograma con puntos de corte) para la identificación de los restos arqueológicos en el yacimiento romano de Valdeherrera (Calatayud). Se puede observar claramente la diferencia entre la imagen del visible y la identificación de los restos arqueológicos gracias a la metodología utilizada en Uribe *et al.* (2015).

	Tipo de sensor y resolución	Longitud de onda (nm) y ancho de banda (nm)	Resolución píxel a 120 metros	Tipo de dron
Olympus EPM-2	VIS 16 Mpx	RGB	3,5 cm / px	Multirrotor
Canon G9X senseFly	VIS 20 Mpx	RGB	2,8 cm / px	Ala Fija
Olympus EPM-1 IR Longpass 1" Edmund Optics	NIR 12 Mpx	700 – 1000	4 cm / px	Multirrotor
Canon S110 senseFly	NIR 12 Mpx	560 (70) / 625 (90) / 850 (100)	4,2 cm / px	Ala Fija
MultiSpec senseFly	Multispectral 1,3 Mpx	550 (40) 660 (40) 735 (10) 790 (40)	12,5 cm / px	Ala Fija
Tetracam Mini MCA 6	Multispectral 1,3 Mpx	490 (10) 550 (10) 680 (10) 720 (10) 800 (10) 920 (20)	12,7 cm / px	Multirrotor
Sequoia Parrot	Multispectral 1,3 Mpx VIS 16 Mpx	550 (40) 660 (40) 735 (10) 790 (40) RGB	11,4 cm / px 3,3 cm / px (RGB)	Multirrotor / Ala Fija
ThermoMap senseFly	Térmica 650 x 512 píxeles	7500 - 13500	22 cm / px	Ala Fija

Tabla 1. Relación de las características de diferentes tipos de sensores con los drones utilizados en este estudio.

bierno de Aragón, Museo de Teruel) consiste en establecer una metodología contrastable de yacimientos de diferentes periodos cronológicos (desde la Edad del Bronce hasta el periodo romano) y con unas características geomorfológicas diversas que permitan localizar estructuras arqueológicas soterradas. Este estudio, todavía en fase de investigación y desarrollo, fue publicado de manera preliminar en Uribe *et al.* (2015) y Angás *et al.* (2016).

Los sensores utilizados han sido integrados en diferentes prototipos de plataformas y drones comerciales del tipo de ala fija y multirrotor. Las longitudes de onda que abarcan varían desde el visible hasta el infrarrojo cercano (NIR) y el térmico.

5. Conclusiones

La utilización de los RPAS o drones en la documentación gráfica y geométrica del patrimonio ofrece varias ventajas, aunque siempre como complemento y combinación con otras técnicas e instrumentos de registro topográfico clásico (estación total y sistema GNSS), tecnología láser, escáner 3D y técnicas de teledetección. De esta manera, permite una rápida documentación gráfica –a través de los diferentes tipos de sensores que se pueden integrar– y métrica si se utiliza un sistema RTK-PPK o se apoya con puntos topográficos localizados sobre el terreno. La utilización de puntos con coordenadas conocidas resulta imprescindible para la correlación automática de las imágenes, la construcción del modelo tridimensional y su inclusión en un sistema de coordenadas absoluto. El trabajo con precisión topográfica permite un control y la

posibilidad de ampliar el área de documentación dentro del mismo sistema de coordenadas. Si analizamos, desde un punto de vista global, el uso de las herramientas dedicadas a la documentación del patrimonio, observamos cómo técnicas como el láser escáner 3D ha sufrido un ligero retroceso en los últimos años frente a las técnicas fotogramétricas descritas. Todas ellas se desprenden del avance de la fotogrametría SfM, con una clara ventaja en accesibilidad, para reconstrucciones tridimensionales terrestres (arquitectura) y aéreas con el uso de los drones.

Por este hecho, si observamos, sintéticamente, la evolución de la técnicas utilizadas en la documentación del patrimonio en los últimos ciento cincuenta años, vemos cómo esta consolidación social o democratización se ha repetido en diferentes períodos. Sobre todo en aquello que las gráficas de Gartner (*vid. supra*) denominan «meseta de la productividad», desde la propia historia de la fotografía con la introducción del carrete Kodak a finales del siglo XIX, la aviación a partir de la Primera Guerra Mundial, las técnicas de computación sobre todo a partir de los años ochenta y noventa del siglo pasado, y la fotogrametría con el clásico *photogrammetry for everybody* (Almagro, 1999) a finales del siglo XX. Actualmente podríamos reproducir como una segunda fase de evolución de estas técnicas, sobre todo a partir del año 2009, con un aumento de software de correlación automática de imágenes, en paralelo a la comercialización y uso de los drones para actividades relacionadas con la documentación e investigación del patrimonio cultural.

Por último, no debemos olvidar el abanico multidisciplinar de aplicaciones que ofrece el desarrollo de esta tecnología en otros sectores (agricultura, cartografía, medio ambiente, robótica, defensa, etc.), donde el patrimonio cultural ha sabido extraer e integrar las técnicas necesarias para mejorar y enriquecer sus procesos de documentación. Por ello, no hay duda de que en los siguientes años los sistemas de documentación aérea de baja altura continuarán, junto con otros avances tecnológicos, haciendo más versátil la utilización de estos dispositivos en la documentación gráfica y geométrica del patrimonio cultural.

6. Bibliografía

- ABER, J. S.; MARZOLFF, I., y RIES, J. B. (2010): *Small-format aerial photography. Principles, techniques and geoscience applications*. Ámsterdam.
- ALMAGRO, A. (1999): «Photogrammetry for everybody». *CIPA International Symposium*, October 3-6, Recife/Olinda, Brazil.
- (2011): «Veintidós años de experiencia de fotogrametría arquitectónica en la Escuela de Estudios Árabes, CSIC». *Documentación gráfica del Patrimonio* (publicación digital): Ministerio de Cultura, pp. 26-45.
- ANGÁS, J. (2005): «Santuarios como indicadores de frontera en el territorio noroccidental de Vulci (siglos VII-III a. C. Italia centro-tirrenica)». *Salduie*, 5: 65-94.
- (2015): *Documentación geométrica del patrimonio cultural: análisis de las técnicas, ensayos y nuevas perspectivas*. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza.
- ANGÁS, J.; URIBE, P., y BEA, M. (2016): «Método y técnicas de aplicación de sistemas drones o RPAS en la investigación arqueológica». *I Congreso de Arqueología y Patrimonio Aragonés (CAPA)*, pp. 541-549.
- CAMPANA, S. (2011): *Remote Sensing, GIS, GPS e tecniche tradizionali. Percorsi integrati per lo studio dei paesaggi archeologici. Murlo-Montalcino e bassa Val di Cornia*. Tesis de Doctorato.
- (2017): «Drones in Archaeology. State-of-the-art and Future Perspectives». *Archaeological Prospection* 999, DOI: 10.1002/arp.1569.

- CAMPANA, S.; FORTE, M., y LIUZZA, C. (2010): *Space, Time, Place. Third International Conference on Remote Sensing in Archaeology*. BAR International Series 2118.
- CHUVIECO, E. (2010): *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona.
- DOWNNEY, R. R. (1980): *A History of Archaeological Air Photography in Great Britain*. Londres.
- EINSENBEISS, H. (2009): *UAV Photogrammetry*. Tesis doctoral inédita. University of Technology Dresden.
- FARJAS, M.; BELLIDO, D., y GONZÁLEZ, L. (2015): *Tecnología UAV en yacimientos arqueológicos. Análisis de precisión de los modelos digitales de superficie y de los productos fotogramétricos derivados*. Madrid: Publicia.
- GONZÁLEZ-REYERO, S. (2007): *La fotografía en la arqueología española (1860-1960): 100 años de discurso arqueológico a través de la imagen*. Madrid.
- GUTIÉRREZ, S. (2001): *Arqueología. Introducción a la historia material de las sociedades del pasado*. Universidad de Alicante.
- LASAPONARA, R., y MASINI, N. (eds.) (2012): *Satellite Remote Sensing: A New Tool for Archaeology*. Springer.
- MANTOVANI, F., y MARCOLONGO, B. (1992): *Fotogeologia. Il Telerilevamento nelle Scienze della Terra*. Roma.
- MORATA, B. (2010): *Fotografía documental de Cabré en las excavaciones de Cerralbo*. Fundación Museo de Cerralbo.
- MUSSON, C.; PALMER, R., y CAMPANA, S. (2005): *In volo nel passato. Aerofotografia e cartografia archeologica*. Florencia.
- (2013): *Flights into the past. Aerial photography, photo interpretation and mapping for archaeology*.
- NIR, Y. (1985): *The Bible and the Image, History of photography in the Holy Land 1839-1899*, Filadelfia: University of Pennsylvania Press.
- PALACIOS, H., y MARTÍN-BUENO, M. (2004): «La teledetección en arqueología: el instrumento SAR». *Salduie*, 4: 331-361.
- REMONDINO, F., y CAMPANA, S. (eds.) (2014): *3D Recording and Modelling in Archaeology and Cultural Heritage. Theory and Best Practices*. BAR International Series 2598, Oxford.
- STOLZE, F. (1882): *Persepolis, die achaemenidischen und sasanidischen Denkmäler und Inschriften von Persepolis, Istakhr, Pasargadae, Shāhpūr*, 2 vols., Berlín.
- UBIETO, A. (2007): *Propuesta metodológica y didáctica para el estudio del patrimonio*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- URIBE, P.; ANGÁS, J.; PÉREZ-CABELLO, F.; DE LA RIVA, J.; BEA, M.; SERRETA, A.; MAGALLÓN, M. A.; SÁENZ, C., y MARTÍN-BUENO, M. (2015): «Aerial mapping and multi-sensors approaches from remote sensing applied to the Roman Archaeological Heritage». *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-5/W4, 2015 3D Virtual Reconstruction and Visualization of Complex Architectures, 25-27 February 2015, Ávila*, pp. 461-467.
- VERHOEVEN, G., y DOCTER, R. (2013): «The amphitheatre of Carnuntum - toward a complete 3D model using airborne structure from motion and dense image matching». *Proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection*, pp. 438-440, Viena.
- VERHOEVEN, G.; DONEUS, M.; ATZBERGER, C.; WESS, M.; RUS, M.; PREGESBAUER, M., y BRIESE, C. (2013): «New approaches for archaeological feature extraction of airborne imaging spectroscopy data», *Archaeological prospection: proceedings of the 10th International Conference on Archaeological Prospection*, pp. 13-15.

Mappings: aumentar la realidad del patrimonio cultural. El ejemplo de #Taüll1123

Albert Sierra Reguera

Agència Catalana del Patrimoni Cultural. Generalitat de Catalunya¹
asierra@gencat.cat

Resumen: El *mapping* consiste en la proyección sobre la superficie de un edificio o de un objeto, de imágenes en movimiento coordinadas con esta, creando la ilusión de que son reales. Desde los primeros *son et lumière* se ha evolucionado vertiginosamente hacia espectáculos donde las esculturas hablan, los edificios se reconstruyen desde la primera piedra y se explican intrincadas historias llenas de personajes y efectos especiales.

¿Tiene sentido utilizar el *mapping*, no como mero espectáculo, sino como herramienta dedicada a la conservación y difusión del patrimonio cultural? Intervenciones como #Taüll1123 nos muestran cómo este camino está abierto y permite, por un lado, la recuperación de monumentos bajo un criterio estrictamente arqueológico, y por otro, hacerlo de forma compatible con la recreación, sobre bases científicas sólidas, de momentos históricos pasados y con la introducción de la sensibilidad contemporánea y la búsqueda de la emoción.

Palabras clave: *Mapping*, *videomapping*, patrimonio cultural, Sant Climent de Taüll, #Taüll1123.

Abstract: *Mapping* is the projection on the surface of a building or an object of moving images coordinated with it, creating the illusion that they are real. From the first «son et lumière» it has evolved vertiginously to shows where the sculptures speak, the buildings are rebuilt from the first stone and intricate stories are explained, full of characters and special effects.

Does it make sense to use mapping, not as a mere show, but as a tool dedicated to the conservation and dissemination of cultural heritage? Interventions such as #Taüll1123 show us how this path is open and allows the recovery of monuments under a strictly archaeological criterion, and on the other hand to do so in a way compatible with the recreation, on solid scientific bases, of past historical moments, and with the introduction of contemporary sensibility and the search for emotion.

Keywords: Mapping, videomapping, cultural Heritage, Sant Climent de Taüll, #Taüll1123.

¹ El equipo que llevó a cabo la intervención #Taüll1123 estaba dirigido por Eva Tarrida, arquitecta, y compuesto por Eduard Riu-Barrera, arqueólogo y quien firma este artículo, los tres de la Dirección General del Patrimonio Cultural de la Generalitat con la colaboración de Pere Rovira, restaurador, de la misma dirección general, y Jordi Camps, conservador del MNAC. El proyecto audiovisual fue obra de Albert Burzon, de Burzon*Comenge, la tecnología de proyección estuvo a cargo de Eloi Maduell, de Playmodes, y la banda sonora de Santi Vilanova, también de Playmodes. Una ficha técnica completa del proyecto se puede encontrar en Íbar (2014).

¿Qué es el *mapping*?

Pocas ciudades europeas hoy en día no han propuesto para una noche de verano o para la celebración de un evento o aniversario un espectáculo audiovisual en una de sus fachadas simbólicas, un *mapping*. Conocido también como *mapping* audiovisual, vídeo *mapping* o *projection mapping* consiste básicamente en la proyección sobre una superficie tridimensional (un edificio, un objeto simple o complejo) de una imagen en movimiento, adaptada a su superficie y ajustada a esta, de forma que simula que las acciones del vídeo ocurren realmente sobre ella. Las posibilidades son infinitas. Desde proyecciones sencillas sobre un cubo en el que cada cara se convierte en una pequeña pantalla, a proyectar una imagen dinámica de la Tierra con sus nubes y continentes sobre una gran esfera simulando su giro. O proyectar sobre la fachada de una catedral la policromía perdida. O simular su construcción desde los primeros bocetos, el levantamiento de los precarios andamios de madera y la construcción de los muros uno por uno.

Antecedentes

Algunos autores llevan los antecedentes del *mapping* a las pinturas en *trompe l'oeil* de pintores como Vasari o Tiepolo (Monteverdi, 2012; Catanese, 2013), pero si somos estrictos, el origen próximo de los *mappings* estaría en el año 1952, cuando Paul Robert Houdin, conservador del castillo de Chambord, puso en marcha el que muy probablemente fue el primer espectáculo audiovisual concebido para un edificio monumental. Se explica que Houdin (nieta del mayor mago de la historia de Francia, Jean Eugène Robert Houdin) tuvo la idea después de contemplar una tremenda tormenta sobre el castillo. Esto le llevó a imaginar una recreación artificial de lo que había contemplado allí (Boucher, 1990; Lux, 1956: 89, 114).

El éxito fue tal que los *son et lumière* se extendieron por diferentes monumentos como Versalles, la Acrópolis de Atenas o diferentes lugares de América (MacGrath, 2003), pero probablemente el más conocido ha sido desde su apertura en 1961 el de las pirámides de Giza que se ha perpetuado durante décadas (Marlowe, 2001).

Aumentar la realidad

La visita cultural, a día de hoy, difícilmente se produce de forma abstracta, con una comunicación directa entre el visitante y el objeto patrimonial. Siempre hay algún grado de mediación. El museo, en sí mismo, es una máquina de crear significados a partir de los diferentes objetos que conforman su colección. Los medios que utiliza son diversos, desde el guía que te acompaña, selecciona los objetos que mirar y te explica qué hay de interesante en cada uno de ellos, hasta la audioguía, que no deja de ser un sustituto tecnológico con el mismo mecanismo comunicativo. Los paneles informativos y cartelas desempeñan el mismo papel. La función última de estos medios es dirigir la mirada, explicar el contexto e incluso revelar la maravilla que supone la creación artística.

En esta función de mediación entre la obra de arte y el público, en determinadas ocasiones un *mapping* puede ser una herramienta extraordinaria (Marlowe, 2001). Puede ayudarnos a explicar una obra añadiendo capas de conocimiento a la realidad, o incluso, añadiendo visualmente, capas de realidades alternativas a la realidad física y todo ello de forma transparente para el espectador, que se ve capturado por la magia que tiene ante sus ojos.

La técnica del *mapping*

El *mapping*, como hemos dicho, consiste en la proyección sobre una superficie tridimensional haciendo coincidir con ella lo proyectado. De esta forma se simulan luces, sombras, colores o figuras en movimiento que toman apariencia de realidad. Una simple proyección de imágenes sobre un edificio no es un *mapping*, es una proyección. Cuando estas imágenes interactúan con la superficie sobre la que se muestran, entonces podemos hablar de *mapping* con propiedad. Para conseguir esto, generalmente el método es escanear el edificio o la superficie sobre la que se va a proyectar y crear un modelo 3D en un programa especializado. A partir de aquí se añaden al modelo los efectos tridimensionales, de iluminación o de proyección que se crean adecuados dentro de un programa de creación de *mappings* como puede ser MadMapper, Resolume u otros². Cuanto más ligado esté lo que se proyecta a la realidad física del elemento, más efectivo será: la lluvia deslizándose por los muros, hiedras subiendo por los balcones, personajes que entran y salen por las ventanas: todo esto será visto como una mágica ensoñación. Los andamios que se levantan sobre el vacío y que dan paso a los muros, hilada a hilada, estos mismos muros abriéndose y mostrando el interior... son, todos ellos efectos que muy a menudo son utilizados en este tipo de proyecciones por su efectividad.

El *mapping* en la escultura



Figura 1. *Golem x MBA*: la Gorgona cobra vida.
Fotografía: BK-France.com

Una de las posibilidades que ha venido siendo explorada básicamente por los museos es la de crear *mappings* sobre esculturas. Ya hace una década, en el Museo del Foro de César Augusta, una escultura cobraba vida (Museo del Foro, 2016), pero en los últimos años se han creado algunas experiencias artísticamente muy destacables. En el Museo de Bellas Artes de Lyon, por ejemplo, con motivo de la celebración de 10 años de adquisiciones y el Mirage Festival, la empresa BK Digital Art Company creó *Golem x MBA*, un proyecto que pretendía experimentar los límites entre la realidad y la virtualidad, en el cual por unas jornadas algunas esculturas cobraban vida, se proyectaban sobre ellas ojos que se abren o rostros que sufrían ante la mirada de los espectadores (BKFrance, 2016, *Golem-x-MBA*, 2016).

Pero probablemente quien ha llevado más lejos este concepto es la Williamson Art Gallery and Museum con su proyecto *Starkers*, que propone una narrativa muy interesante: jugar con la ambivalencia de contemplar una escultura que, en realidad, no deja de ser una mujer desnuda y los consiguientes prejuicios implícitos de cada espectador. Encargado para la Noche de los Mu-

² Para una completa explicación sobre la técnica del *mapping*, el hardware y el software necesarios para proyectos sean grandes o pequeños, es muy útil el manual de Maniello (Maniello, 2015) y la web <http://projection-mapping.org>



Figura 2. *Starkers*. Un viaje por la figura femenina y los prejuicios que le asociamos. Fotografía: Davyandkristinmcguire.com.

seos de 2015 a los artistas Davy y Kristin McGuire, la pareja artística ha creado un relato que va más allá de lo obvio y nos hace reflexionar sobre nuestra visión contemporánea de la mujer (*Starkers*, 2016).

En otros proyectos la pareja ha explorado con indudable creatividad la proyección sobre pequeños teatros de papel, componiendo obras deliciosas.

Sobre esculturas se han proyectado *mappings* que van desde la difusión con base científica como el dedicado a la «Pareja Etrusca» (Guidazzoli, 2015), hasta los que son primordialmente divertimento, como el de los soldados de terracota en el Moesgaard Museum (*How to colour a terracota soldier*, 2016).

El *mapping* en la arquitectura

Si los *son et lumière* son indudablemente franceses, no debería extrañarnos que desde hace décadas en Francia se haya experimentado con este tipo de proyecciones. La empresa Skertzò (actualmente Athem-Skertzò) comenzó en 1999 en la catedral de Amiens devolviendo la policromía a las figuras de la fachada en sesiones nocturnas, con un tremendo éxito (*La colorisation de la cathédrale d'Amiens*, 2008). Desde los primeros proyectores de imágenes fijas, la evolución tecnológica ha llevado estas proyecciones sobre catedrales y castillos hasta sofisticadas creaciones 3D en las que vemos infinidad de efectos, como en los ejemplos de Reims, Rouen, Poitiers o Beauvais: el trazado de los planos, el levantamiento de andamios, los perfiles de los obreros trabajando en ellos, las piezas de la catedral montándose como si de un puzzle se tratara, la luz de los vitrales, los detalles de la escultura... (Athem-Skertzò, 2016).

Pero si un proyecto destacó en su momento por la creatividad y por su integración entre la historia y creación visual fue el dedicado al 600 aniversario del Reloj Astronómico de Praga en el año 2010. La profunda comprensión de los valores del monumento y su transmisión a un guion audiovisual lleno de imaginación lo han convertido en un referente, sin ir más lejos, también para nosotros (600 Years, 2010). Todo gira, como es lógico, alrededor del concepto del tiempo, incluso los efectos lumínicos; cómo lleva la representación de los astros hasta la esfera del reloj, cómo abre sus muros para mostrar los mecanismos, la representación de la etapa comunista, todo es un derroche de calidad y buen gusto.

Múltiples *mappings* han seguido la ruta abierta por Skertzo o The Macula; no es extraño encontrar los mismos efectos en cada fachada (la lluvia, los andamios, la hiedra...). Pero otros salen de la norma y en su confluencia con otras artes generan proyectos innovadores, como en el año 2012 el que se proyectó en la Casa Milà, *La Pedrera*, y que incorporaba la danza contemporánea. Los bailarines reales aparecían por balcones y ventanas y, de pronto, en su versión digital, trepaban por las paredes y hacían piruetas imposibles (Llum BCN-La Pedrera, 2015).

Un camino híbrido entre arquitectura y escultura es el que siguió el MediaLab del Metropolitan Museum de Nueva York con su proyecto de coloreado de las esculturas del templo egipcio de Dendur. Una iniciativa modesta, en la que, con apreciable rigor científico, se devolvía el color perdido a una serie de figuras en uno de los muros del templo y se creaban unas sencillas animaciones de estas figuras (Felsen, 2015).



Figura 3. La policromía proyectada de la fachada de la catedral de Amiens. Fotografía: Athem-Skertzo.com.

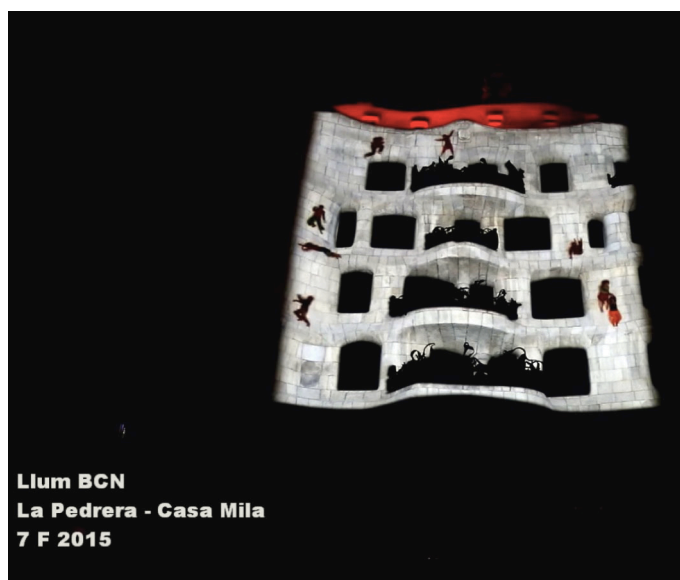


Figura 5. La danza contemporánea toma los muros de La Pedrera gracias al *mapping* dedicado al centenario de su construcción. Fotografía: Elizabeth Yeom, YouTube.com.

Figura 4. El Reloj Astronómico de Praga, un ejemplo de *mapping* creativo. Fotografía: TheMacula.com



Figura 6. Matt Felsen ajustando el proyector sobre el templo de Dendur en el Metropolitan Museum de Nueva York. Fotografía: Erin Peters en Metmuseum.org.

Videoinstalaciones complejas

En la frontera del *videomapping* están las videoinstalaciones a partir de imágenes culturales en grandes pantallas que configuran una sala o un espacio complejo. Probablemente el más conocido, puesto que lleva ya años de gira por todo el mundo, es *Van Gogh Alive*, donde imágenes de los cuadros del pintor son proyectadas sobre diferentes superficies de forma que envuelven totalmente al espectador (Van Gogh Alive, 2016).

Un concepto similar es el que recientemente puso en marcha el Museo del Prado con motivo de su exposición dedicada al Bosco, con la instalación *El Jardín Infinito*, creada por los artistas Álvaro Perdices y Andrés Sanz (*Jardín Infinito*, 2016). Múltiples proyectores dan forma a un recorrido que se convierte en un laberinto por el interior del *Jardín de las Delicias* donde el espectador se ve totalmente inmerso en el universo del pintor flamenco.

El proyecto #Taüll1123

Hemos visto hasta ahora una amplia panorámica de las diferentes tipologías existentes de *mapping* sobre elementos culturales y patrimoniales. Ahora nos centraremos en un ejemplo concreto, el proyecto #Taüll1123, en el que, a partir de la necesidad de generar una nueva copia de las pinturas para instalarla en el ábside la iglesia, se desarrolló un proyecto de *mapping* audiovisual que ha sido unánimemente reconocido (Santos, 2014)³.

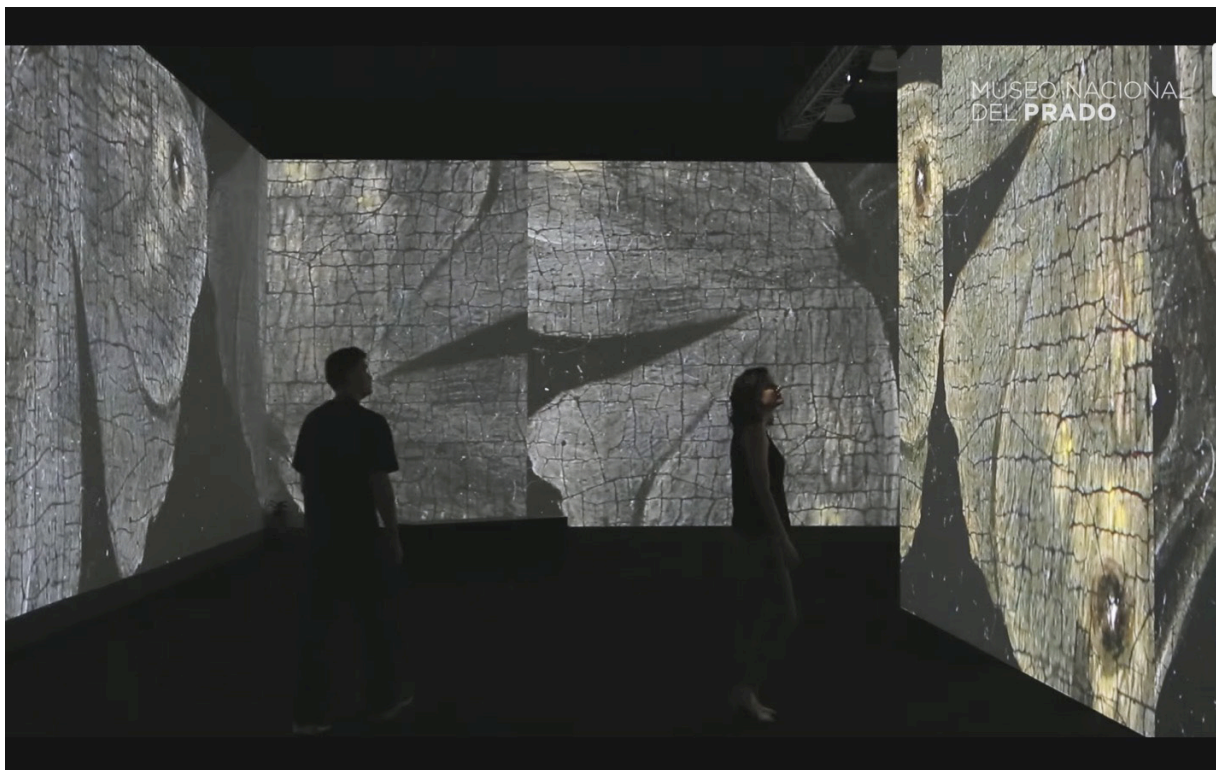


Figura 7. *El Jardín infinito*, del Bosco, en el Museo del Prado. Fotografía: Museodelprado.es

³ #Taüll1123 ganó el premio «Best of the Web» del año 2014 al mejor proyecto audiovisual en el congreso Museums & the Web celebrado en Baltimore. También ha sido galardonado con un Laus de Oro.

De entre las iglesias del valle de Boí, Sant Climent de Taüll es, sin lugar a dudas, la más conocida, gracias a su arquitectura prácticamente intacta desde la época románica, pero principalmente por sus pinturas murales, concretamente por el Cristo en Majestad que fue descubierto por personajes de la talla de Domenech i Montaner o Puig i Cadafalch y que, después de complejas vicisitudes, fue trasladado al Museo de Arte en Barcelona, actual Museu Nacional d'Art de Catalunya. El conjunto de iglesias del valle fue objeto de protección legal a partir de 1992 y de una larga serie de intervenciones de restauración (Abelló, 2000) finalmente declarado como Patrimonio Mundial en el año 2000.

A partir del año 2009, de nuevo las iglesias fueron objeto de atención por su incorporación al programa de restauración «Románico Abierto»⁴. La actuación más destacada de este programa fue la intervención en la iglesia de Sant Climent⁵.

En 2012, a pesar de su merecida fama y del todavía apreciable nivel de visitas que conataba, el estado de la iglesia no era el mejor posible. De hecho, requería de una intervención urgente en varios puntos: en la cubierta se apreciaban algunos desperfectos, en la base de los ábsides se hacían visibles humedades y la museografía del año 2000 había quedado algo anticuada, pero, por encima de todo, la copia de las pinturas del ábside, con el Cristo en Majestad como su elemento central, que Ramon Millet había realizado en el año 1959, estaba en muy mal estado, con los colores ya muy diferentes a los del original, con diversas grietas y degradaciones. Además, el pavimento del ábside, también necesitaba una intervención después de ser excavado arqueológicamente. A esta situación física cabía añadir que, después de algunos años de estancamiento en las visitas en todo el valle, se buscaba algún elemento que pudiera renovar el interés por acudir a ella.

A partir de esta situación se fue configurando una propuesta de restauración que solucionara las deficiencias detectadas, pero que sobre todo devolviera el esplendor a la iglesia, dotándola de una mejor calidad de visita y potenciando los valores arquitectónicos y pictóricos que atesoraba y que en ese momento estaban ocultos. En este sentido cabe destacar que a pesar de que la pintura principal de la iglesia está en un museo, en los muros del templo permanece gran cantidad de pintura mural románica en buen estado, como por ejemplo la figura de un can entre cenefas sobre el ábside del evangelio, las figuras de san Clemente y san Pedro en los pilares, o la escena de Caín y Abel en el presbiterio (Pagès, 2013).

La primera propuesta fue la de crear una nueva copia física, similar a la de Millet, pero construida a partir de la última tecnología disponible, el soporte «PapelGel», que a partir de fotografías de alta resolución del original, transfiere la tinta de esta imagen en escala 1:1 a un nuevo soporte físico hecho con mortero tradicional. Este método se había utilizado anteriormente para las iglesias de Santa Maria d'Àneu i Castell de Mur con muy buenos resultados⁶.

Esta propuesta quedó rápidamente descartada cuando en el proceso de estudio de la documentación sobre Sant Climent se detectó una fotografía en la cual se veía claramente

⁴ «Románico Abierto» fue promovido por el Departament de Cultura de la Generalitat y la Obra Social «La Caixa» con diferentes iniciativas de difusión y la restauración de 77 monumentos románicos de Cataluña. En la intervención de Sant Climent de Taüll ha recibido la colaboración especial del Museu Nacional d'Art de Catalunya, del Obispado de Urgell y del Consorcio del Patrimonio Mundial de Vall de Boí.

⁵ Existen diferentes artículos sobre esta actuación: Riu-Barrera (2014), Íbar (2014), Camps (2015), de la que también se puede obtener información y recursos audiovisuales en las webs <http://pantocrator.cat/> y <http://www.romanicobert.cat/taull1123>

⁶ En la actualidad PapelGel tiene como nombre comercial ArsusPapel. Se pueden consultar las intervenciones sobre Santa Maria d'Àneu y Castell de Mur en su web: <http://www.arsuspapel.com/> y en este vídeo: <https://www.youtube.com/watch?v=RBBcglALoWU>



Figura 8. Tras el retablo tardogótico de la iglesia, se aprecia cómo en la cuenca del ábside, tras el arrancado de las capas superficiales, todavía se conservan las capas profundas. Fotografía: Biblioteca de Catalunya, Fondo Salvany, 1920.

cómo tras el arrancado de las pinturas del ábside, permanecían en el muro trazos más que visibles de las capas profundas de la pintura.

Para confirmar esta hipótesis se realizaron catas y endoscopias que confirmaron la existencia de gran cantidad de pintura original, si bien degradada, todavía en los muros originales del ábside central.

A partir de este momento, y sustentado por el objetivo principal de recuperar valor pictórico y arquitectónico para la iglesia, se busca la manera de recuperar esta pintura mural existente y compatibilizarla con la presentación de la pintura desaparecida. En Castell de Mur, que también conserva capas profundas, esta compatibilización se plasmaba en una reproducción que está montada sobre un bastidor que puede ser abierto para contemplar las capas profundas originales.

En el caso de Taüll, sin embargo, se investigó una vía diferente: la de la reproducción virtual proyectada. Esta opción había sido estudiada en ocasiones anteriores (en Castell de Mur sin ir más lejos), pero había sido descartada por las limitaciones tecnológicas de ese momento. Por otro lado, los avances en tratamiento digital de la imagen y en la propia tecnología de proyección en los últimos años habían sido espectaculares y permitían ya imaginar un resultado que pudiera estar a la altura de los objetivos.

La propuesta de creación de una copia virtual proyectada tenía grandes ventajas: la primordial, la de permitir una recuperación total de la originalidad matérica en los muros y, simultáneamente, ofrecer una visión total de las pinturas conservadas, dos objetivos que de otra

forma eran excluyentes. De esta manera la recuperación del potencial cultural del templo era máxima.

La proyección abría además un nuevo camino: la posibilidad de crear un fragmento audiovisual que conectara con el intelecto del público visitante, pero también con su empatía y sus emociones. Hacerle conocer las pinturas más en profundidad y además ayudarle a apreciarlas en detalle y a sentirlas como parte de un legado común. Las experiencias de Skertzo en Amiens y muy especialmente del *mapping* del 600 aniversario del Reloj Astronómico de Praga, como hemos dicho, eran referentes que se tenían como modélicos. Después de consultar con diferentes instituciones y empresas con experiencia audiovisual, se programó una serie de pruebas de proyección en la iglesia de Sant Climent para comprobar si los niveles de calidad de la proyección sobre una superficie tan difícil como la del ábside eran suficientes como para dar vía libre al proyecto. Burzon*Comenge, en la parte gráfica, y Playmodes, en la parte tecnológica, fueron los escogidos para llevar adelante el proyecto. Las pruebas fueron totalmente satisfactorias tanto por la nitidez y calidad de color de los proyectores actuales como por la comprobación de que los niveles lumínicos entraban perfectamente dentro de los límites aconsejados por la conservación de las pinturas.

Para conseguir los objetivos mencionados era necesaria una exigencia máxima, porque en primer lugar se trata de una pintura icónica, una de las representaciones de la divinidad más importantes de la pintura catalana, si no la que más. El contexto además es el de una iglesia declarada Patrimonio Mundial por la Unesco. Así pues, era necesaria la máxima calidad técnica y artística. La proyección en sí misma era muy compleja, porque la superficie de proyección (el ábside, el presbiterio, el frontis superior) combina superficies planas con cóncavas y además con fragmentos existentes, con los cuales la proyección debía encajar al milímetro. Toda la operativa tecnológica (proyectores, ordenadores, cableado) debía ser prácticamente invisible para el espectador, para mantener la idiosincrasia del lugar y la calidad de visita. No era un espectáculo, sino un elemento más de la visita, consustancial a la arquitectura y en continuidad con esta y con la lectura cultural del conjunto.

Así pues, se programó una intervención unitaria e integrada con cuatro vertientes: el estudio científico del edificio y las pinturas, la restauración arquitectónica, que incluía medidas de conservación y de mejora de la visita, la restauración pictórica y, finalmente, la instalación de la copia virtual por proyección.

Se inició con el estudio de la documentación escrita y fotográfica que existe sobre Sant Climent de Taüll, desde que las pinturas fueron descubiertas en 1904 hasta la actualidad, con especial atención a las imágenes del arrancado y traslado e instalación en Barcelona. En los muros de la iglesia la investigación permitió localizar dos fases de decoración anteriores a las pinturas conocidas, una de encintado blanco entre sillares y una segunda, de decoración vegetal, en las tres ventanas inferiores, correspondientes a una fase primigenia del templo y posteriormente amortizadas.

Tanto las pinturas conservadas en el Museu Nacional d'Art de Catalunya como los restos conservados en los muros de la iglesia fueron estudiados también al detalle, con objeto de preparar las imágenes que servirían de base al *mapping*.

Respecto a la intervención arquitectónica, las primeras medidas de conservación arquitectónica se llevaron a cabo a finales de 2012 y estaban dirigidas a evitar las humedades de la cabecera del templo. Se construyó un drenaje perimetral y se repararon las cubiertas. En esta operación de cubiertas se retiró una viga del frontis de la nave central, lo que dejó al descubierto un espléndido fragmento de pintura románica, un soldado tocando un cuerno.



Figura 9. El interior de Sant Climent de Taüll con la proyección de las pinturas existentes en el MNAC en funcionamiento. Fotografía: Eloi Maduella. Playmodes.

Por lo que respecta al ábside, se diseñó un nuevo pavimento de madera y un nuevo altar en su centro que recuperaba el ara original. En la parte posterior el pavimento se eleva en un pliegue que conforma un banco presbiterial y que a la vez oculta los dos proyectores del *mapping* ubicados en el ábside.

También se cambiaron las instalaciones de la iglesia, con una nueva iluminación interior que resaltaba los fragmentos de pintura existentes. La museografía del templo también fue renovada, tanto los paneles de señalización como las vitrinas que albergan las esculturas románicas del templo, la maqueta que muestra la decoración exterior de la iglesia y el módulo con un nuevo audiovisual sobre la historia del descubrimiento erudito de Sant Climent de Taüll.

La operación más importante previa a la instalación del *mapping* fue indudablemente la restauración de las capas profundas originales del ábside. Para ello se retiró la copia del año 1959 bajo la que apareció una capa de pintura (azulete) que cubría por completo las pinturas originales. Con infinita paciencia, de forma manual, a punta de espátula y bisturí, se fue retirando esta capa superficial durante cuatro meses de trabajo, y tras la consolidación de los soportes y el tratamiento de fisuras y lagunas, las capas pictóricas originales estaban ya a la vista.

En paralelo a los trabajos de conservación, se comenzó el desarrollo de la copia virtual y el *mapping*. Para ello, desde un primer momento todo el equipo de trabajo estuvo de acuerdo en intentar mostrar tres diferentes estadios. El primero ponía delante del espectador la realidad material: las capas profundas y las pinturas conservadas realmente en los muros. El

segundo era la copia virtual propiamente dicha, que superponía a las capas profundas las pinturas existentes en el MNAC y las hacía coincidir con los fragmentos todavía existentes en los muros. En este segundo estadio el visitante contemplaba la realidad matérica y la realidad virtual imbricadas, como si las pinturas hubieran vuelto a su lugar de origen. Y, finalmente, el tercer estadio era una apuesta por la ciencia y la emoción. Por la ciencia con la creación de una hipótesis perfectamente sustentada de cómo eran las pinturas en el siglo XII, y por la emoción porque el visitante llegaba hasta esta hipótesis a través de un viaje en el tiempo que le descubría cómo se habían pintado.

Este tercer estadio se configuró a partir de un guion redactado con la colaboración del MNAC y que de las primeras versiones, más historicistas, se fue depurando hasta el resultado final, exclusivamente centrado en las propias pinturas. El objetivo era presentar la hipótesis de cómo era la iglesia en el año 1123, justo en el momento de creación de las pinturas. Desde el primer momento se optó por darle un carácter narrativo, porque de esta manera se subrayaba su condición de hipótesis, pero también porque permitía abordar los aspectos que se querían comunicar: el propio hecho pictórico, mostrando el proceso de creación; la calidad artística y formal, recreando la pincelada en los fragmentos más relevantes, y la iconografía y los significados, a partir de la individualización de personajes. Todo ello sin palabras, con el objetivo de hacer ver, de transformar la mirada del visitante, grabando en su memoria visual las imágenes de la pintura para que después, cuando desaparezca la virtualidad, las reconozca en los restos físicos.

Técnicamente, el primer paso para conseguir la copia virtual era conseguir una réplica exacta de la volumetría en 3D del presbiterio de la iglesia y, posteriormente, una imagen digital de máxima calidad de todas las pinturas, las que están todavía en los muros y las que se



Figura 10. La reconstrucción virtual de las pinturas en la hipótesis de cómo eran en el año de su creación 1123. Fotografía: Eloi Maduell. Playmodes.

trasladaron al MNAC. Una vez conseguidas estas dos piezas, se deberían situar todas las pinturas en su lugar correspondiente en el entramado 3D, desplegarlo hasta conseguir una imagen completa en 2D y editar la secuencia audiovisual desde este punto.

Así pues, la primera tarea fue el escaneado láser 3D (un punto cada 3 mm) de toda la zona del presbiterio y la realización de fotografías de alta resolución de las pinturas tanto en la iglesia como en el MNAC. La nube de puntos del 3D resultante fue simplificada y mallada para insertar las fotografías de las pinturas encajando los fragmentos y, como se ha dicho, se desplegó para conseguir una superficie bidimensional que pudiera ser trabajada gráficamente.

De esta forma se conseguía ya el material para los dos primeros estadios de proyección, pero para construir el tercero era necesaria la restauración virtual de las pinturas y su «deconstrucción» por así decirlo en sus diferentes capas, para poder posteriormente animarlas. Este proceso de restauración virtual fue complejo. Por un lado, se retocaron las grietas y lagunas del original, así como las marcas de corte y también un pronunciado desencaje, alrededor de la mandorla, producido a principios del siglo xx por causa de las diferentes medidas entre el ábside original y el bastidor en el que fue montado en el museo. Por otro, se afrontaba la recuperación de los fragmentos pictóricos de la iglesia en los cuales se recuperaban colores y redibujaban perfiles, a partir del estudio y la comparación con los fragmentos mejor conservados. Y finalmente había que afrontar la recreación de las partes perdidas de la pintura. En este sentido cabe señalar que la pintura románica en general, y la del ábside de Sant Climent en concreto, se organiza en registros con ritmos y medidas precisas, y por tanto se puede afrontar esta reconstrucción sobre bases sólidas. Así, el estudio de la geometría general, de las cenefas, colores de



Figura 11. El 3D de la superficie del ábside con las pinturas que se han conservado insertadas en su lugar, tanto las existentes en la iglesia como las conservadas en el MNAC. Imagen: Josep Giribet. Calidos.

fondo y elementos arquitectónicos y decorativos han permitido una reconstrucción detallada. En algunas escenas, el análisis de los pequeños fragmentos existentes en los muros ha llevado de hecho a nuevas hipótesis figurativas, especialmente en los arcos triunfales, donde las figuras de los ángeles que aguantan el clípeo en sus manos han sido delineados por primera vez.

Como hemos mencionado, para generar la animación era necesario descomponer en capas toda la pintura, especialmente la figura central de Cristo, que tuvo que ser pintada de nuevo, capa por capa, para posteriormente poder recrear este proceso.

En lo que respecta al sistema de proyección, la especial geometría de la superficie a bañar de luz obligó a un esquema complejo de seis proyectores, dos en la entrada de la iglesia, sobre la recepción, dos en las naves laterales, ocultos tras soportes metálicos, y dos en el ábside en la parte posterior del pavimento.

Con este esquema la instalación era prácticamente invisible para el espectador y el detalle conseguido en cada una de las secciones era suficiente, sin problemas de pixelado aparente.

El sistema de proyección se completó con dos ordenadores centrales en el espacio situado sobre la recepción que transmiten la señal HD de alta calidad de forma simultánea y sincronizada a los seis proyectores.

El objetivo inicial, que la proyección no fuera aparente sino que se integrara en la superficie real de los muros de forma transparente, fue conseguido, y en el segundo estadio, las pinturas físicas y proyectadas conviven visualmente de forma armoniosa.

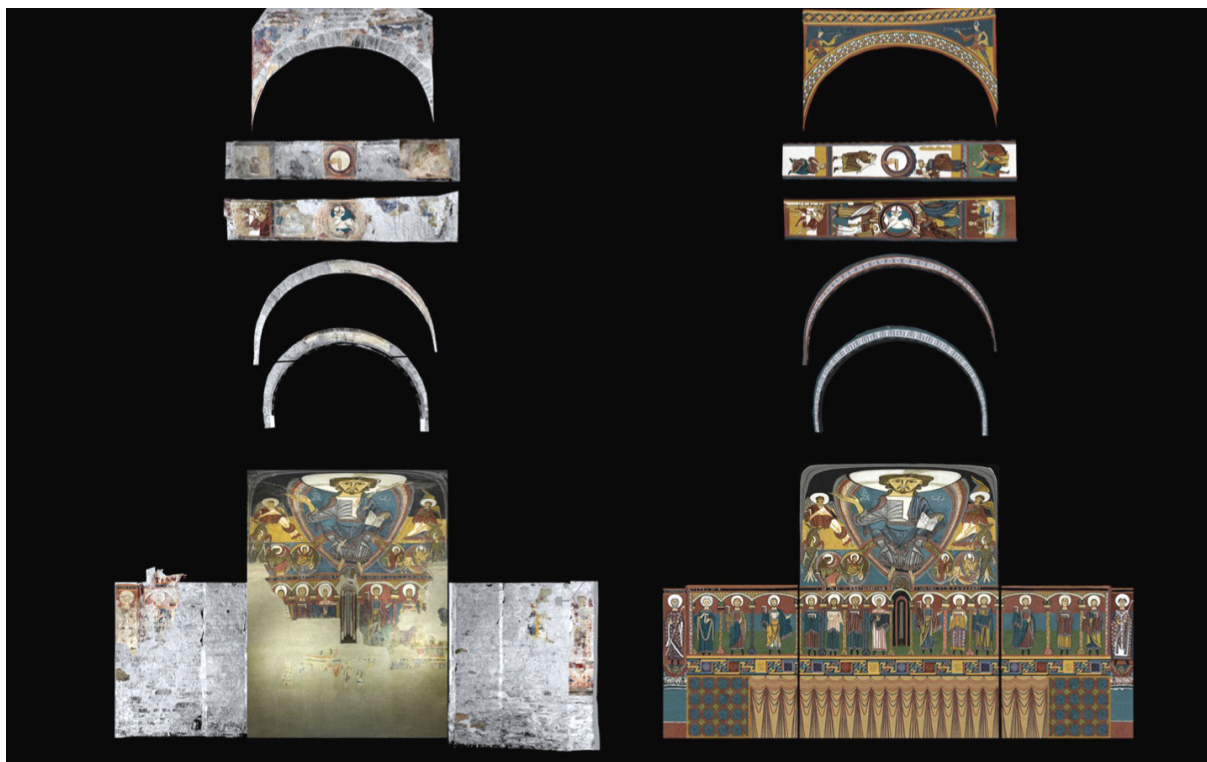


Figura 12. La superficie de la pintura desplegada para su tratamiento de restauración y reconstrucción virtual. A la izquierda la pintura conservada, a la derecha la reconstrucción finalizada. Imagen: Albert Burzon, Burzon*Comenge.

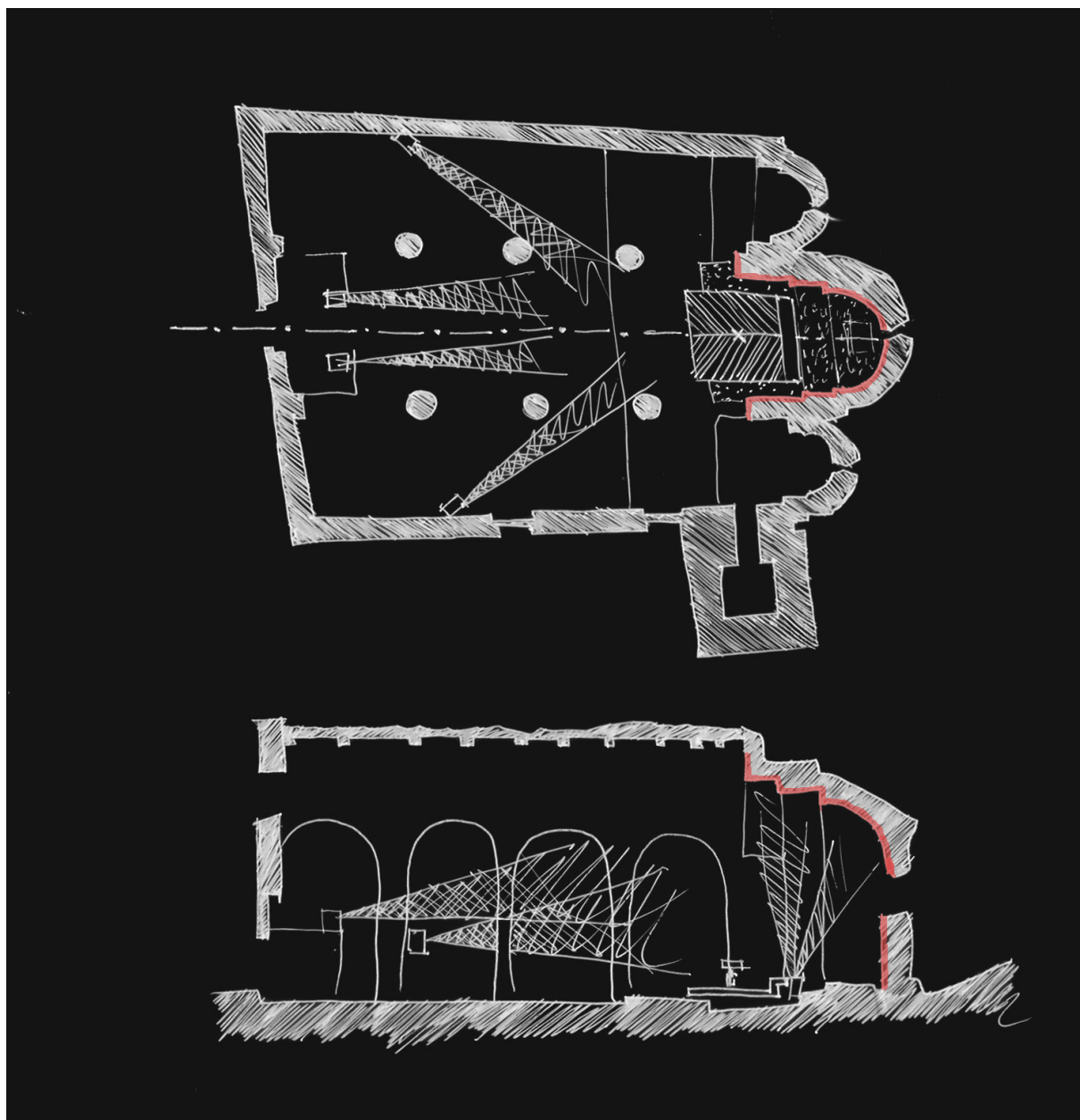


Figura 13. El esquema de proyección: dos en la parte baja del ábside, dos sobre el módulo de entrada y dos en los laterales para cubrir toda la superficie central del presbiterio, marcada en rojo. Dibujo: Albert Burzon: Burzon*Comenge.

La banda sonora, creada especialmente, se trabajó con los mismos criterios que la parte visual: una combinación de recuperación científica y creatividad contemporánea. Se grabaron, por un lado, los sonidos de ambiente en la propia iglesia y en el valle, y por otro, diferentes instrumentos medievales, que se procesaron hasta crear un instrumento digital capaz de interpretar una partitura contemporánea pero manteniendo la tímbrica y los ambientes sonoros medievales.

El tercer estadio fue concebido como un viaje en el tiempo. Las luces de la iglesia se apagan lentamente y comienza una narración audiovisual en la cual vemos cómo sobre el ábside van apareciendo progresivamente las líneas que delimitan la geometría de la pintura, los fondos de color, las siluetas de las figuras y cenefas..., como si fuéramos testigos



Figura 14. La pintura románica física y la proyectada, en continuidad y convivencia. Fotografía: Eloi Maduell. Playmodes.



Figura 15. Los tres estados de la iglesia. A la izquierda, la realidad física de los restos de pintura en sus muros. En el centro, la pintura conservada, tanto la de la iglesia como la del MNAC. A la derecha la hipótesis de reconstrucción: el mapping #Taüll1123. Fotografías: Eloi Maduell. Playmodes.

de la creación del conjunto. La acción se entretiene en la Alfa y la Omega, en la inscripción «Ego sum lux mundi», en las pinceladas que progresivamente van creando el rostro de Cristo... Poco a poco se va construyendo todo el conjunto, que podemos contemplar solo parcialmente iluminado con lo que parece la luz de unas velas. Finalmente, la luz baña todo el ábside y contemplamos el conjunto completo. Y en un giro final, un haz de luz nos desvela lo que hay detrás de la magia y nos devuelve al tiempo presente, dejando ante nosotros los muros desnudos, con las capas profundas y las pinturas físicas como únicas compañeras.

El ciclo temporal por el cual se proyectan los tres estadios fue establecido en 30 minutos. Durante 17 se proyectan las pinturas existentes, el estadio 2; posteriormente se proyecta el estadio 3, con nueve minutos de duración y que en su final nos traslada al estadio 1, que permanece durante tres minutos y vuelta a empezar. De esta forma, en el tiempo estimado de visita (35-45 minutos) cada visitante puede contemplar los tres, y si lo desea puede ver dos veces el fragmento audiovisual (lo que ocurre con frecuencia).

Conclusión

La intervención en Sant Climent nos demuestra que el *mapping* puede ser una herramienta más en las manos de los conservadores y restauradores. Evidentemente tiene un potencial enorme para la creación de espectáculos, pero esta no deja de ser una función muy concreta de entre las muchas posibles. Cuando su uso es posible, e incluso conveniente para un elemento patrimonial, tiene grandes ventajas frente a otros tipos de restituciones, como por ejemplo la realidad aumentada o las pantallas de vídeo. En el *mapping*, la tecnología puede ser invisible para el espectador, no existe una barrera aparente entre este y el bien artístico. Esto nos permite crear las condiciones para jugar con la percepción del visitante, para crear magia y que el juego sea aceptado. Si lo que mostramos se basa en una investigación científica rigurosa y además le añadimos la creatividad contemporánea, el camino a recorrer es infinito.

Bibliografía

- 600 Years (2010): *The Macula* [en línea]. Disponible en: <<https://vimeo.com/130039339>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- ABELLÓ, M., y SIERRA, A. (2000): *El programa Vall de Boí*. XIII Congreso de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Lleida.
- Athem-Skertzo (2016) [en línea]. Disponible en: <<http://www.athem-skertzo.com/>> [consulta en 27 de diciembre de 2016].
- BK-France (2016): [en línea]. Disponible en: <<http://www.bk-france.com/#/golemxmlba/>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- BOUCHER, J.-J. (1993): *Le prestige de Chambord*. París: F. Lanore.
— (1990). *Chambord*. París: F. Lanore.
- CAMPS, J., y SIERRA, A. (2015): «El románico visto desde el siglo XXI». *RDM. Revista de Museología*, 62: 92-102. Madrid.
- CATANESE, R. (2013): «3D Architectural Videomapping». *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-5/W2. XXIV International CIPA Symposium. Strasbourg. Disponible en: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-5-W2/165/2013/>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- FELSEN, M., y PETERS, E.: *Color the Temple: Using Projected Light to Restore Color*. Metmuseum. [en línea]. Disponible en: <<http://www.metmuseum.org/blogs/digital-underground/2015/color-the-temple>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Golem-x-MBA (2016): Behance [en línea]. Disponible en: <<https://www.behance.net/gallery/27036259/Golem-x-MBA>>. <https://www.behance.net/gallery/23433471/Golem-x-Apollo> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- GRANELL, E., y RAMÓN, A. (eds.) (2006): *Lluís Domènech i Montaner Viatges per l'arquitectura romànica*. Barcelona.
- GUARDIA, M. et al. (1993): *La descoberta de la pintura mural romànica catalana. La col·lecció de reproduccions del MNAC*. Barcelona: Electa.
- GUIDAZZOLI, A. et al. (2015): «The Etruscans and the Afterlife. An Engaging Exhibition with Accurate Scientific, Technological and Communicative Requirements». *Digital Heritage 2015*. Disponible en: <<https://www.researchgate.net/publication/282439292>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- How to colour a terracota soldier (2016) [en línea]. Disponible en: <<http://www.moesgaardmuseum.dk/en/exhibitions/previous-exhibitions/chinas-terracotta-army/how-to-colour-a-terracotta-soldier/>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- ÍBAR, E., y RIU-BARRERA, E. (2014): *Sant Climent de Taüll: noves estratègies de restitució i divulgació del patrimoni a la Vall de Boí*. XXXVIIè Curset jornades internacionals sobre la intervenció en el patrimoni arquitectònic. «Patrimoni sacre: permanent innovació» AADIPA. COAC. Barcelona. Disponible en: <<http://upcommons.upc.edu/handle/2099/16413>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Jardín Infinito (2016): Museo del Prado [en línea]. Disponible en: <<https://www.museodelprado.es/actualidad/exposicion/jardin-infinito/8776099b-f37a-4c5e-b706-e8b06928a4ae>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- La colorisation de la cathédrale d'Amiens (2008): Images de Picardie. Disponible en: <<http://fresques.ina.fr/picardie/fiche-media/Picard00719/la-colorisation-de-la-cathedrale-d-amiens.html>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].

- Llum BCN: La Pedrera-Casa Milà* (2015) [en línea]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=jquLAJwn_Mg> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Lux. La revue de l'éclairage* (1956): Vol. 24-26. París: Association des ingénieurs de l'éclairage.
- MANIELLO, D. (2015): *Augmented reality in public spaces: Basic techniques for video mapping*. Brienza: Le Penseur.
- MARLOWE, E. (2001): «Cold War Illuminations of the Classical Past: the Sound and Light Show on the Athenian Acropolis». *Art History*, 24 (4): 578-597. Disponible en: <https://www.academia.edu/841700/Cold_War_Illuminations_of_the_Classical_Past_the_Sound_and_Light_Show_on_the_Athenian_Acropolis> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- MATEOS, S. M., y GUIFREU, A. (2014): «Reconstrucción y activación del patrimonio artístico con tecnología audiovisual. Experiencia de Taüll 1123». *El Profesional de la Información*, 23 (5): 527-533. Disponible en: <http://dspace.uvic.cat:8888/handle/10854/3276> [consulta en 27 de diciembre de 2016].
- MCGRATH, I. (1992). *Son et Lumiere: an epic reading. Doctor of Creative Arts thesis*. Wollongong: School of Creative Arts, University of Wollongong. Disponible en: <<http://ro.uow.edu.au/theses/956>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- MONTEVERDI, A. M., y GENTILE, E. (2012): *Dal videomapping all'interaction design per il teatro*. Ateatro. Disponible en: <<http://www.ateatro.org/mostranotizie2.asp?num=137&ord=31>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Museo del Foro de CesarAugusta* (2016) [en línea]. Disponible en: <<http://www.zaragoza.es/ciudad/museos/es/foro>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Pantocrator.cat* (2014) [en línea]. Disponible en: <<http://pantocrator.cat/>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- PAGÈS, M. «Sant Climent de Taül: noves pintures, nova lectura». *Anuari Verdaguer 21*. Disponible en: <<http://www.raco.cat/index.php/AnuariVerdaguer/article/viewFile/279189/367708>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- RIU-BARRERA, E., y TARRIDA, E. (2014): «La nova configuració de l'absis major de Sant Climent de Taüll amb els vestigis d'art fugitiu». *Art fugitiu. Estudis d'art medieval desplaçat (EMAC-CONTEXTOS)*. Rosa ALCOY (ed.). Universitat de Barcelona.
- Starkers* (2016): Davy y Kristin McGuire [en línea]. Disponible en: <http://www.davyandkristinmcguire.com/starkers.html> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Taüll 1123. La restauración del abside de Sant Climent de Taüll. Románico Abierto* (2014) [en línea]. Disponible en: <<http://www.romanicobert.cat/web/guest/taull1123>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].
- Van Gogh Alive* (2016) [en línea]. Disponible en: <<http://vangogh-alive.com/>> [consulta el 27 de diciembre de 2016].

Desarrollo de tecnologías para la detección precoz de contaminantes biológicos. Aplicaciones a vitrinas de aire y anoxia

Nieves Valentín

Instituto de Patrimonio Cultural de España
nieves.valentin@mecd.es

Benigno Sánchez

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
benigno.sanchez@ciemat.es

Daniel Durán

Instituto de Patrimonio Cultural de España
daniel.duran@mecd.es

Carmen Muro

Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía
carmen.muro@museoreinasofia.es

Isabel Herráez

Instituto de Patrimonio Cultural de España
isabel.herraez@mecd.es

Olga Vilanova

Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas
olga.vilanova@ciemat.es

Julia Montero

Instituto de Patrimonio Cultural de España
julia.montero@mecd

Antonio Manrique

Instituto de Patrimonio Cultural de España
antonio.manrique@mecd.es

Alex Gaztañaga

Instituto de Patrimonio Cultural de España
fagaztanaga@gmail.com

Resumen: Los microorganismos son buenos indicadores de la aceptabilidad de las condiciones ambientales. Su identificación y cuantificación es esencial para evaluar la calidad del aire interior en un museo, así como la eficacia de la atmósfera en vitrinas o en cajas de embalaje que albergan bienes culturales.

En el presente trabajo se han desarrollado sistemas de detección precoz de microorganismos que alertan de riesgos de microcondensaciones y crecimiento de hongos y bacterias en

objetos históricos. Los sistemas se basan en el uso de biosensores depositados en vitrinas o contenedores herméticos. Asimismo, la detección precoz del desarrollo microbiológico se ha analizado utilizando desorción térmica programada asociada a cromatografía de gases y espectrometría de masas (ATD-GC-MS) que permite la identificación y cuantificación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) emitidos por los microorganismos que crecen en un material histórico. Los resultados permiten diferenciar el origen del COV y la correlación específica microorganismo-COV.

Ambos sistemas evitan las tomas de muestras de material procedente de bienes culturales. Asimismo, se han utilizado para evaluar la eficacia de vitrinas pasivas, ya contengan atmósferas de aire o gas inerte en el caso de vitrinas de anoxia.

Palabras clave: Microorganismos, detección precoz, biosensores, compuestos orgánicos volátiles, anoxia.

Abstract: Microorganisms are good indicators of the acceptability of environmental conditions. Its identification and quantification is essential to evaluate the air quality indoor museums and the effectiveness of the atmosphere in the display cases and hermetic containers that hold cultural properties.

In this work, we have developed different systems for the early detection of microorganisms which warn about the risks of micro-condensation and fungal and bacteria growth on historic objects. They are based on the use of biosensors which are deposited inside showcases. In addition, early detection of microbiological development has been analyzed using gas chromatography-mass spectrometry (ATDGC-MS), which allows the quantification and identification of volatile organic compounds (VOC) emitted by microorganisms growing on an object. The results allow us to distinguish the origin of the VOC emitted and the specific correlation microorganism-VOC.

Both systems avoid taking samples of material from historic objects. In addition, they have been used to evaluate the effectiveness of passive showcases, whether they contain different atmospheres such as air or an inert gas in the case of anoxia cases.

Keywords: Microorganisms, early detection, biosensors, volatile organic compounds, anoxia.

1. Introducción

Este trabajo forma parte del proyecto «Desarrollo de tecnologías para la detección precoz de contaminantes biológicos. Aplicaciones a vitrinas de aire y anoxia», que se enmarca dentro del Plan Nacional de Investigación en Conservación (PNIC2015/01) auspiciado por el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

Los estudios de contaminación microbiológica ambiental han permitido evaluar la calidad del aire interior en un museo, así como de la atmósfera inmediatamente en contacto con las obras de arte que se encuentran depositadas en vitrinas o en contenedores ubicados en almacenes. Para ello se han venido utilizando tomas de muestras de bioaerosoles y de microorganismos de superficie de los objetos (Valentín, Muro, y Montero, 2010).

Como métodos alternativos, se han desarrollado sistemas basados en el uso de **biosensores** que indican la formación de condensaciones frías de superficie que dan lugar al creci-

miento rápido de microorganismos sobre el material higroscópico que le sirve de soporte. Los biosensores son sistemas de alarma que alertan del desarrollo microbiano en su soporte antes de que se produzca el crecimiento en el bien cultural. En ensayos preliminares (Valentín, 2015), los biosensores fueron depositados en vitrinas de museos junto a los materiales históricos. Posteriormente, fueron analizados para evaluar el impacto ambiental y la carga microbiana a la que estaban expuestos. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios en todos los casos investigados.

En el presente trabajo hemos optimizado la elaboración de biosensores utilizando diversos materiales tratados con medios de cultivo adecuados al desarrollo de microorganismos ambientales. En ocasiones, se ha añadido un marcador que indica un cambio de color cuando se produce el crecimiento microbiano. Adicionalmente, se ha acoplado un *data logger* al biosensor, para registrar las condiciones ambientales acaecidas durante su tiempo de exposición dentro de la vitrina a investigar.

Comparativamente, la detección precoz del desarrollo microbiológico ha sido también evaluada utilizando otra técnica analítica, ATD-GC-MS, que permite la cuantificación e identificación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) que emiten hongos y bacterias al crecer en un objeto. Los resultados permiten diferenciar el origen del COV emitido, ya sea un microorganismo o los componentes de las vitrinas donde los bienes culturales se encuentran depositados.

Las técnicas descritas se han aplicado a vitrinas de aire y están siendo desarrolladas para incorporarlas a las vitrinas de anoxia.

2. Detección precoz de microorganismos

2.1. Diseño y aplicación de biosensores

Los biosensores utilizados deben estar conformados por los siguientes materiales:

- **Soporte higroscópico.** Puede elegirse un material de naturaleza similar al objeto que deseamos proteger en la vitrina. Se aconseja que el material sea rugoso, lo que permitirá una mayor deposición de contaminantes biológicos. Los materiales más utilizados en este estudio han sido: textil (lino), papel (Whatman® n.º 1), pergamino y vitela.
- **Medio de cultivo.** El soporte debe ser impregnado con un medio de cultivo adecuado al desarrollo de microorganismos ambientales. Los más eficaces han resultado ser; agar sabouraud, agar czapeck y rosa de bengala. Se puede añadir un marcador al medio de cultivo, tal como el Thiazolyl Blue Tetrazolium Bromide (MTT), que potencia el cambio de color en los microorganismos desarrollados. El medio de cultivo debe deshidratarse para evitar un posible rápido desarrollo inicial de microorganismos antes o inmediatamente después de que el biosensor sea instalado en la vitrina.
- **Data logger.** Registrará la temperatura (TªC) y humedad relativa (HR%) durante la exposición del biosensor a la contaminación de la atmósfera de la vitrina. Permitirá correlacionar Tª/HR con crecimiento microbiano.

El sistema descrito debe ser esterilizado (con ultravioleta, por ejemplo) antes de depositarse en el interior de las vitrinas o contenedores para su estudio.

Metodología

El biosensor más el *data logger* deben ser depositados junto al bien cultural que se desea proteger durante un periodo de tiempo que llamamos tiempo de exposición (T_{exp}), expresado en días y que depende de:

- a) Las condiciones ambientales y características específicas de la sala de exposición donde se ubican las vitrinas que van a ser investigadas.
- b) Características y materiales constructivos de las propias vitrinas.
- c) Tipo de mantenimiento de las vitrinas.

En el exterior de la vitrina debe instalarse asimismo un biosensor, cuyo resultado servirá para correlacionar datos. Podemos considerarlo como control.

Análisis de biosensores

Una vez instalados los biosensores en las vitrinas, puede ocurrir que en un periodo comprendido entre 5 y 20 días se detecte visualmente un desarrollo incipiente de micelio. Ello indicará que existen microcondensaciones de HR en el interior de la vitrina susceptibles de generar multiplicación celular. Este fenómeno ocurrirá en el biosensor antes que en el bien cultural. En este caso, debe extraerse el biosensor y ser analizado para determinar cualitativa y cuantitativamente el riesgo potencial de biodeterioro dentro de la vitrina. Los datos que aporte el *data logger* confirmarán esos riesgos. No obstante, lo más frecuente es que no se detecte visualmente desarrollo microbiano en un T_{exp} , que puede ir de 30 a 60 días, para vitrinas y museos con unas condiciones ambientales razonablemente buenas. En este caso, transcurrido el T_{exp} , debe extraerse y analizarse el biosensor y reemplazarse por otro nuevo. El método de análisis se puede resumir:

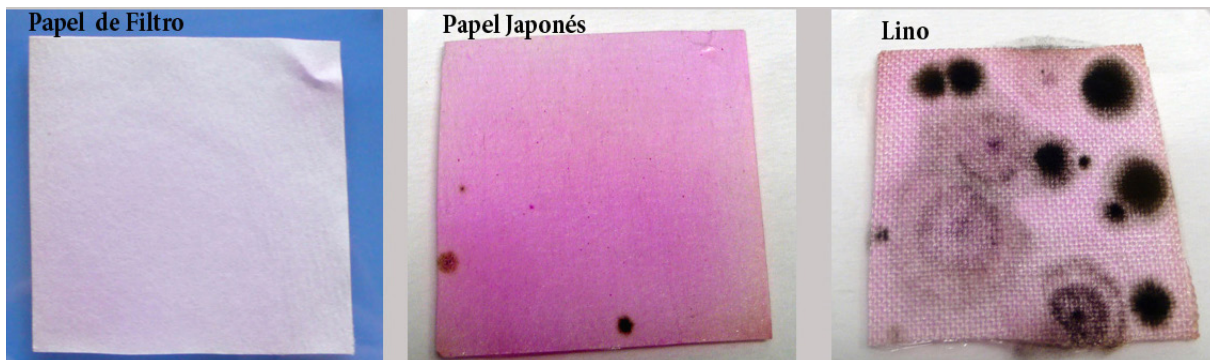
- a) Humectación del biosensor con solución salina estéril NaCl (0,09%).
- b) Incubación a T^a que puede estar comprendida entre 28-30 °C para microorganismos ambientales termófilos, fundamentalmente hongos. El periodo de incubación requerirá como máximo 15 días.
- c) Evaluación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes detectados. Particular atención debe prestarse a los microorganismos celulolíticos y proteolíticos.
- d) Correlación de los datos de origen biológico con los parámetros ambientales registrados en el interior y exterior de la vitrina.

En caso de riesgos de contaminación, debe ponerse en marcha un protocolo que contemple revisar la gestión ambiental de las salas y vitrinas y su mantenimiento, atendiendo especialmente a las colecciones más sensibles.

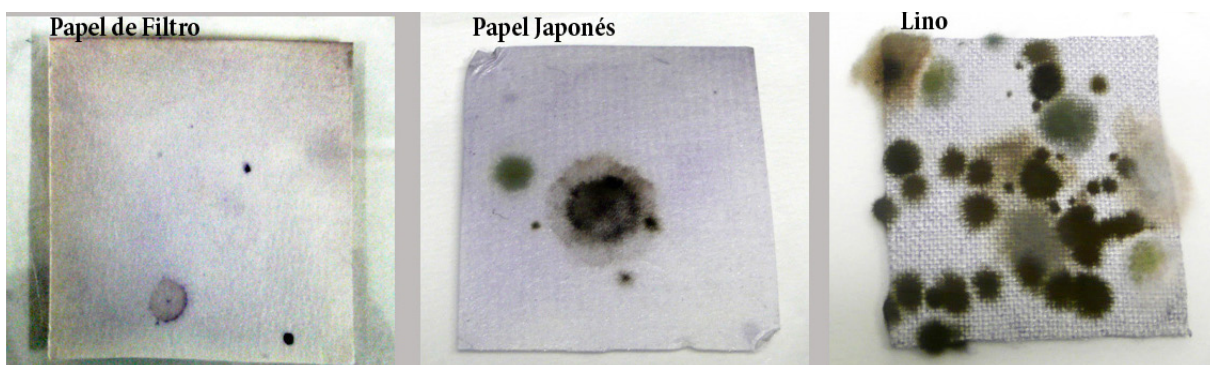
Las figuras 1a y 1b muestran biosensores elaborados con soportes y medios de cultivo diversos.

Aplicación práctica

Como ejemplo se muestran los análisis realizados con biosensores depositados en una vitrina instalada en el Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS). El objetivo fue detectar riesgos de alteraciones que podrían tener su origen durante los procesos de mejora de las salas de exposición y de sus vitrinas.



a)



b)

Figuras 1a y 1b. Biosensores tratados con rosa de bengala (a) y agar Sabouraud (b). Fotografía: Julia Montero.

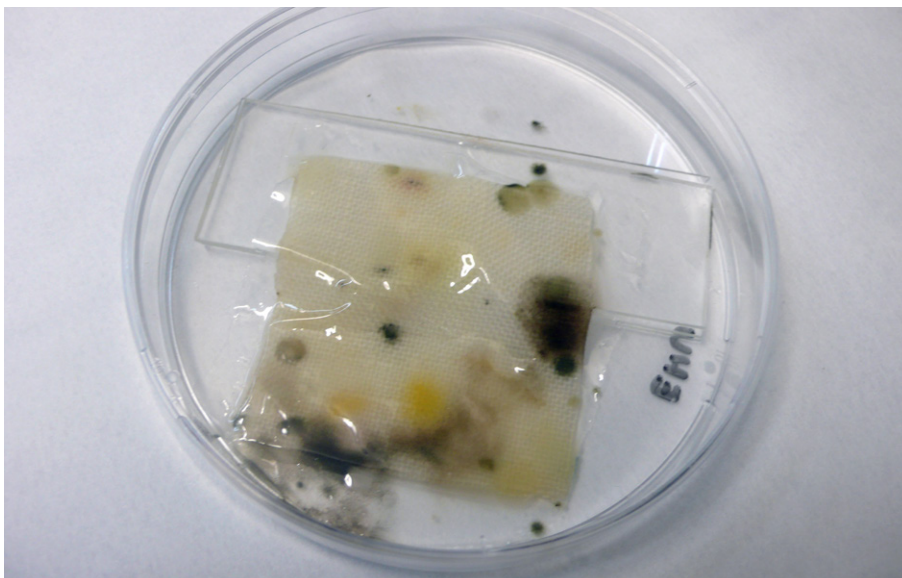


Figura 2. Biosensor tratado con agar-czapek y cubierto con lámina de plástico para mantener la humedad. Fotografía: Alex Gaztañaga

La figura 3a muestra el interior de la vitrina donde se exhibe papel prensa bajo el cual se han depositado diferentes tipos de biosensores elaborados con lino, papel, pergamino y vitela. Todos ellos tenían un tamaño de 4×4 cm y estaban impregnados con un medio de cultivo de agar-sabouraud. En la figura 3b se observan idénticos tipos de biosensores y *data logger* en exterior de la vitrina.



Figuras 3a y 3b. Biosensores y data logger instalados en el interior (a) y exterior de la vitrina (b). Fotografía: Nieves Valentín.

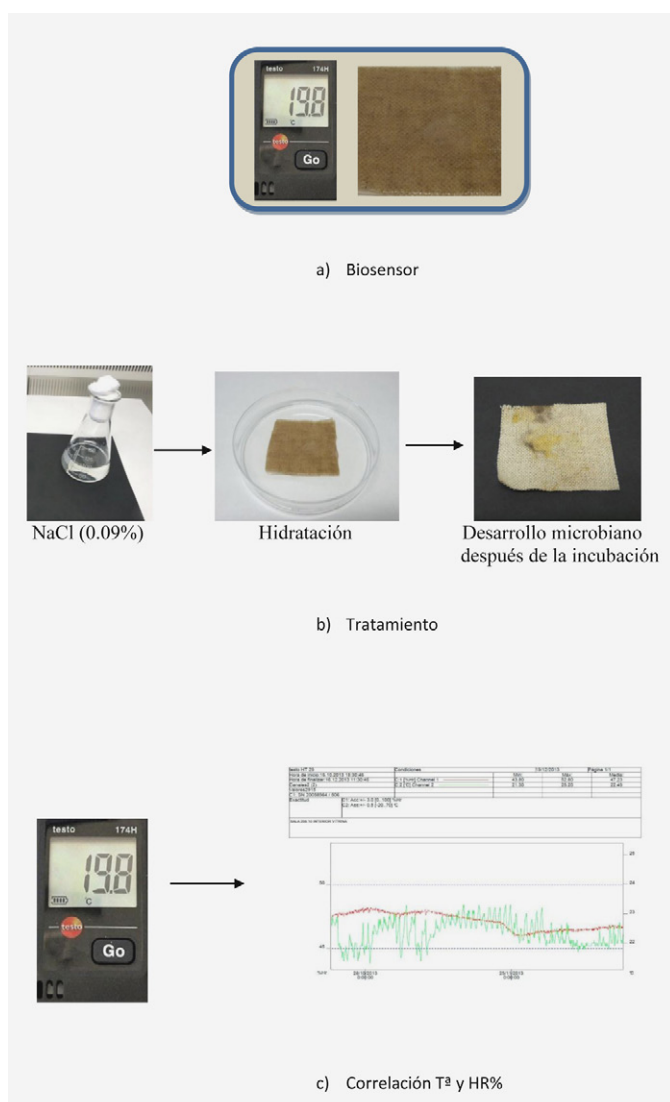


Figura 4. Tratamiento de hidratación y de incubación del biosensor. Data logger complementario. Fotografía: Nieves Valentín.

Transcurrido un T_{exp} de cinco semanas, los biosensores fueron analizados siguiendo la metodología descrita previamente. La figura 4 ilustra el procedimiento.

Los resultados que indican la contaminación ambiental en el exterior e interior de la vitrina se muestran en la figura 5 y se expresan en CFU/muestra (unidades formadoras de colonias/muestra). Se ha observado una moderada contaminación por microorganismos ambientales correspondientes a *Cladosporium sp*, *Penicillium chrysogenum* (hongos) y *Micrococcus luteus* (bacteria).

En el caso de análisis de microorganismos de superficie, los umbrales de contaminación se circunscriben a valores superiores a 25 CFU/cm²; por lo tanto, la contaminación en los biosensores analizados no fue significativa y es susceptible de disminuir en función de la optimización de los parámetros ambientales.

En estudios previos (Valentín, 2015) se ha observado que los COV que pueden ser emitidos por los componentes de una vitrina inhiben el desarrollo de microorganismos sobre el biosensor. El efecto es más acusado

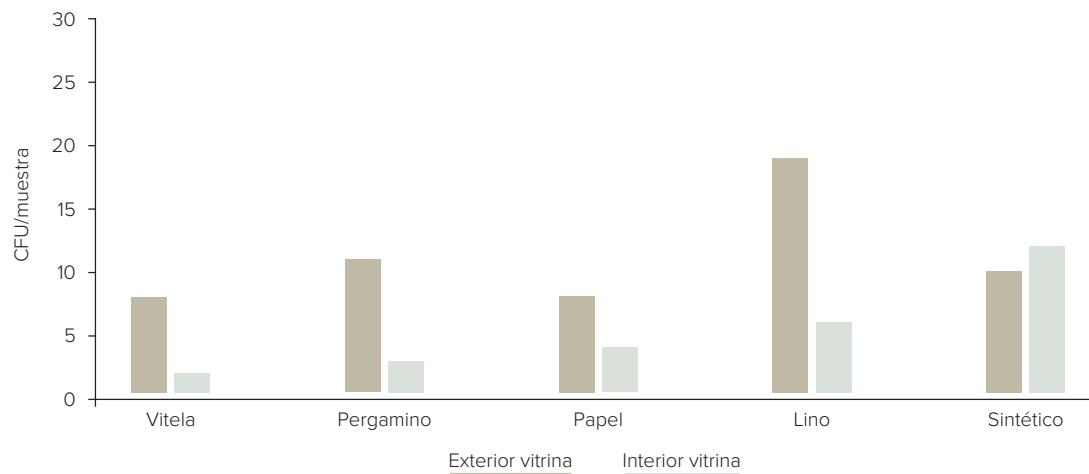


Figura 5. Desarrollo de microorganismos sobre biosensores expuestos en el interior y exterior de la vitrina durante cinco semanas.

en vitrinas de alta hermeticidad. Por tanto, cuando no hay desarrollo microbiano en un biosensor puede ser debido a la presencia de una concentración significativa de COV en la urna de la vitrina. Dependiendo del COV puede verse desnaturalizado el ADN del microorganismo en contacto.

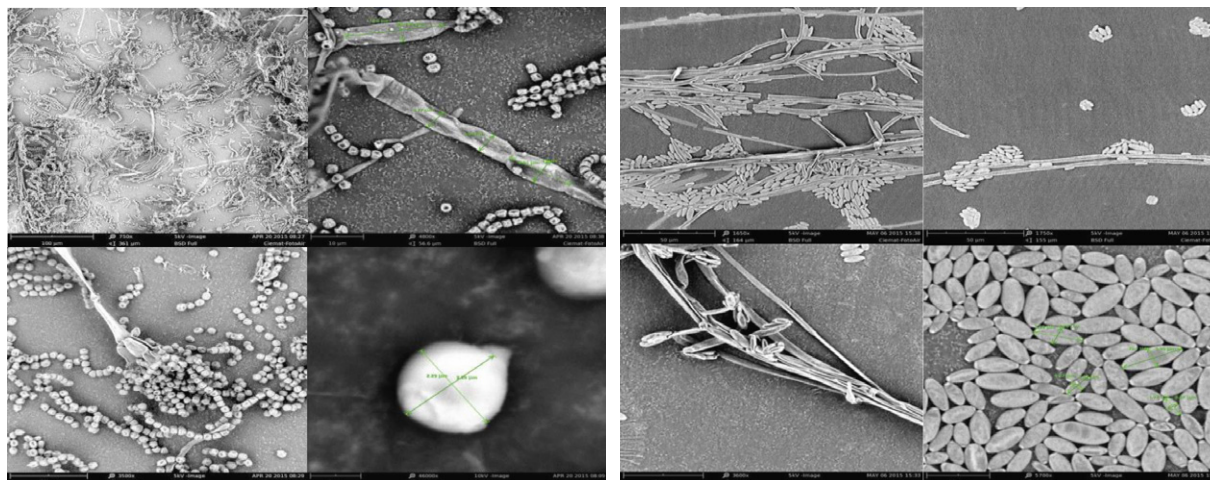
A partir de los datos expuestos podemos concluir:

- El biosensor es una herramienta útil para la conservación preventiva de bienes culturales de naturaleza orgánica. Es visual, sostenible y permite la detección precoz de microorganismos debido a microclimas desfavorables.
- El material utilizado para la elaboración del biosensor debe ser higroscópico y rugoso. El lino tratado con agar sabouraud o rosa de bengala, como medios de cultivo, ha resultado ser el soporte más efectivo para detectar con rapidez crecimiento inicial fúngico.
- El tiempo de exposición dependerá de las condiciones ambientales en la vitrina y la naturaleza de los objetos históricos. Cuanto más desfavorables sean los microclimas el tiempo de exposición debe ser menor.

2.2. Detección de compuestos orgánicos volátiles emitidos precozmente por microorganismos

Como modelo de trabajo para este estudio se han utilizado dos hongos, *Penicillium chrysogenum* y *Fusarium verticillioides*. Los micetos fueron caracterizados por *microscopía electrónica de barrido*. La figura 6a muestra *P. chrysogenum* con hifas septadas de ancho medio 5,10 μm y largo medio 16 μm , las cuales terminan en conidióforos. Las conidias o esporas son redondas, con un diámetro medio de 2,5 μm , unicelulares dispuestas como cadenas no ramificadas en el extremo de las fiálidas.

El hongo *F. verticillioides* presenta abundantes microconidias sin septos, de forma oval y tamaño medio 6,6 μm $\times$ 2,9 μm que forman agrupaciones a partir de monofiálides laterales (figura 6b).



Figuras 6a y 6b. Imágenes de microscopía electrónica de barrido: a) *Penicillium chrysogenum*; b) *Fusarium verticillioides*. Fotografías: Olga Vilanova.

Metodología experimental de los muestreos

Se han utilizado dos tipos de muestreos: con aire forzado y pasivos.

Para **muestreos con aire forzado** se ideó una cámara de crecimiento del hongo (bolsa) elaborada con plástico de alta barrera Velox® utilizada en procesos de anoxia. El procedimiento consiste en hacer crecer sobre un medio de cultivo al hongo confinado en la bolsa para que emita a la atmósfera los COV generados por su metabolismo. Posteriormente, un aire denominado cero, libre de contaminación, se circula a través de la bolsa fluyendo al exterior por el tubo de salida sobre el que se fija un tubo adsorbente basado en óxido de 2,6-difenilfenileno (Tenax®).

El desarrollo del montaje incluyó una bomba Gilian GilAir Plus para generar un flujo de aire de entrada regulado por una llave colocada entre la bomba y la bolsa. En la salida se conectó otra llave entre la bolsa y el tubo Tenax® para controlar la salida de aire (figura 7). Se utilizaron tubos de silicona y teflón por su menor emisión de COV. La figura 8a muestra los tubos Tenax® TA y la bomba de muestreo Gilian.

Los COV se recogen en tubos de acero inoxidable rellenos con 250 mg de Tenax® TA. Estos adsorbentes se acondicionan durante 45 min a 290 °C en atmósfera inerte circulando a su través un caudal de 70 ml/min de helio. Una vez tomada la muestra, los tubos de Tenax® TA se cierran con conexiones Swagelok y juntas de Teflón® y se almacenan en congelador a -20 °C hasta su análisis. Los tubos se analizan siguiendo el método TO-17 de la EPA (1999).

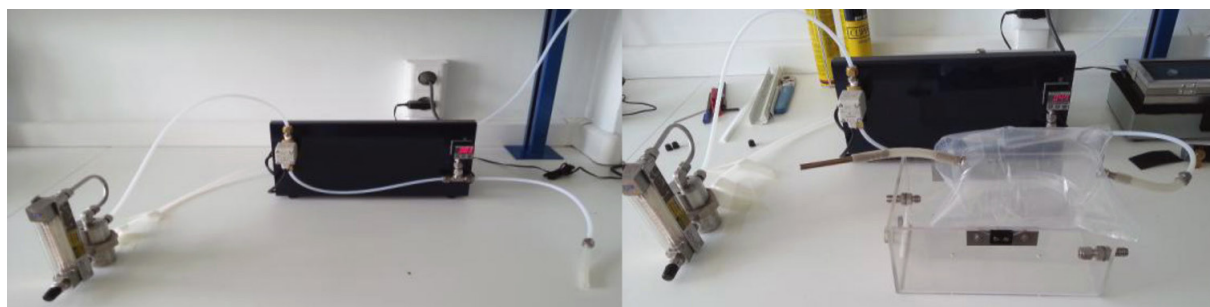


Figura 7. Sistema de muestreo con aire forzado. Fotografía: Benigno Sánchez.



Figuras 8a y 8b. a) Tubos Tenax® TA y bomba de muestreo Gilian. b) Muestreo pasivo Fotografías: Benigno Sánchez.

Para un **muestreo pasivo**, se prepara una bolsa herméticamente sellada (figura 8b). En este caso el tubo Tenax® se coloca en el interior de la bolsa en contacto con el aire que se quiere analizar. Por difusión, el aire entra en el tubo quedando retenidos los compuestos en el material adsorbente. Este muestreo se realiza durante los días fijados en estufa a 25 °C. El tiempo de muestreo ensayado para *P. chrysogenum* fue de tres y cinco días.

Procedimiento

El análisis de COV emitidos únicamente por el hongo requiere un análisis paralelo de los compuestos producidos por cada uno de los elementos implicados en el muestreo. Para evitar la determinación de falsos positivos por rotura, permeación o difusión de compuestos no emitidos directamente por el hongo, en cada ensayo se han analizado los COV presentes en el ambiente. En muestreo pasivos, el ambiente se refiere al interior de la estufa. Para el muestreo del aire del laboratorio se utilizó una bomba Gilian GilAir Plus con un caudal de 200 cc/min. También se caracterizó el aire del circuito, para ensayos con aire forzado, y los compuestos emitidos por la bolsa, la placa de Petri y el medio de cultivo (extracto de malta). Con este procedimiento discriminamos claramente entre los COV emitidos por el hongo de los existentes en todos los procesos y elementos con los que el medio de cultivo está en contacto.

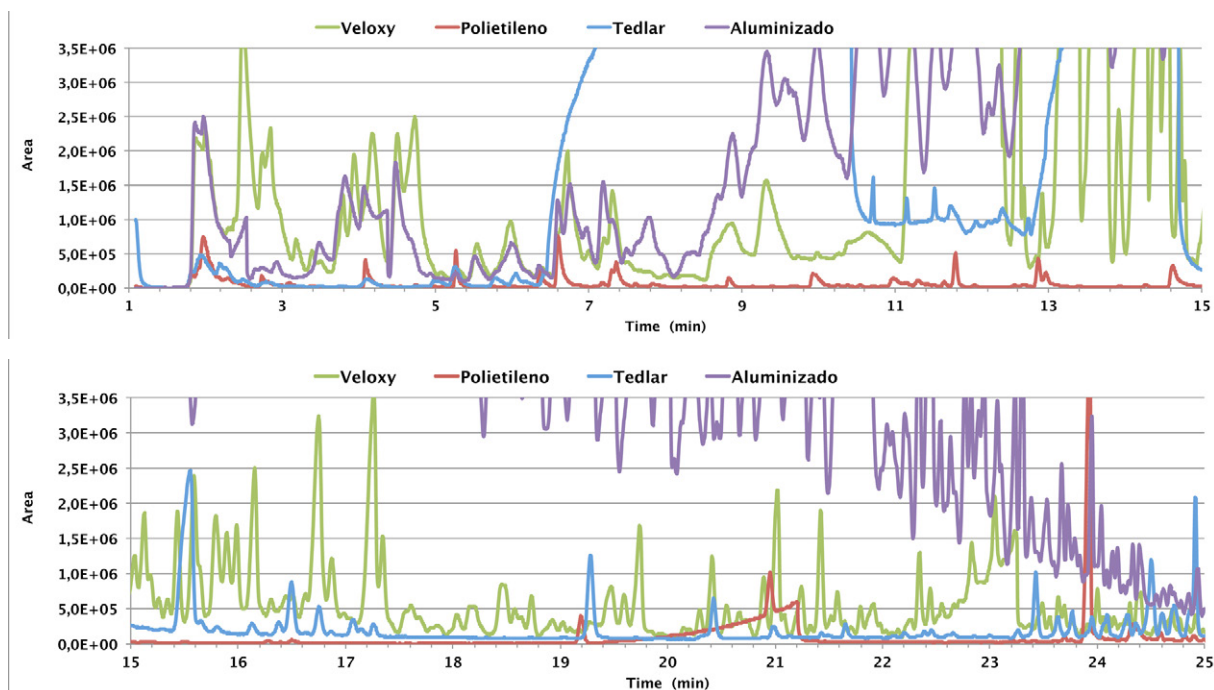
Emisión de COV por *Penicillium chrysogenum*

Inicialmente, se puso en marcha un muestreo activo de una hora donde se realizó la caracterización del aire del ambiente del laboratorio, el aire del circuito, la bolsa utilizada (fabricada con el plástico Veloxty®), la placa de Petri sola, la placa de Petri con el medio extracto de malta y la placa sembrada con hongo *P. chrysogenum*, que en este ensayo es de ocho días de crecimiento.

Los resultados obtenidos mostraron una alta emisión de COV relacionados con el plástico Veloxty®, que solapaban con las posibles emisiones del hongo. Por consiguiente, se decidió analizar otros plásticos alternativos con la menor emisión de COV para la construcción de las bolsas. En los ensayos se emplearon bolsas de **polietileno**, bolsas **Tedlar® PVDF**, compuestas de polifluoruro de vinilideno (PVDF) y **plástico aluminizado**, Marvelseal®. Para este estudio comparativo se procedió a un muestreo pasivo con cinco días de duración.

Todas las muestras se analizaron según el procedimiento descrito anteriormente mediante ATD-GC-MS.

Las figuras 9a y 9b muestran comparativamente los cromatogramas correspondientes a las emisiones liberadas por cada uno de los materiales analizados. En el cromatograma 9a se representa del minuto 1 al 12, en el segundo, 9b, del minuto 12 al 24.



Figuras 9a y 9b. Resultados comparativos en cromatogramas correspondientes a muestreo realizado con Veloxy®, Polietileno, Tedlar® y aluminizado: 9a) muestreo de 1 a 12 minutos; 9b) muestreo de 12 a 24 minutos.

Las áreas normalizadas se expresan en forma de tanto por ciento. Con esta información se ha desarrollado el cuadro (figura 10). En él se aprecian los COV emitidos por *P. chrysogenum* y que no aparecen liberados por ninguno del resto de elementos del muestreo. En la figura 10 se expresan los COV emitidos solamente por el hongo de ocho días de crecimiento y analizados después de un muestreo activo.

Se ha observado que los cinco compuestos que con mayor probabilidad están relacionados con el metabolismo de *Penicillium chrysogenum* cuando crece sobre medio extracto de malta son: 1-Pentadecene, 3,4-Octadiene, 7-methyl, E-1,9Tetradecadiene, 1 β -hydroxy-12-methoxy-19-nor-5 β podocarpa-3,8,11,13-tetraen-2-one y Androst-4-en,3,17-dion-19-oic acid. Estudios realizados por Joblin *et al.* (2010) han servido de referencia.

Emisión de volátiles en función del estado de desarrollo del hongo

La comparativa en la emisión de volátiles se efectuó utilizando una placa con *P. chrysogenum* recién sembrado y otra placa del hongo con 14 días de crecimiento a 25 °C. Se observa que la diferencia más significativa en la emisión de COV de un estado de crecimiento a otro es la abundancia de volátiles emitidos, siendo esta mayor en el hongo de 14 días que en el recién sembrado. No obstante, este hecho se invierte en el caso de algunos compuestos como el Androst-4-en, 3,17-dion-19-oic acid. También se observan compuestos que solo son emitidos en un estado de crecimiento. Por tanto, el desarrollo del hongo influye en el tipo de volátiles que va a emitir, probablemente debido a que las necesidades del hongo varían en función del estado de desarrollo. Sería viable pensar que las rutas metabólicas utilizadas en un momento u otro pueden ser diferentes, y por consiguiente los volátiles emitidos. Estudios preliminares sobre la caracterización de metabolitos volátiles de *Penicillium* fueron realizados por Larsen y Frisvad (1995).

TR	COMPUESTO	MUESTREO ACTIVO					
		Ambiente (1h)	Aire circuito (1h)	Bolsa (1h)	Bolsa+placa sin medio (1h)	Bolsa+placa con medio (1h)	Bolsa+medio con Penicillium 8d (1h)
1.913	Ethanol	49.34	1.09	6.48	5.63	19.58	0.00
1.966	Oxirane trimethyl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.54
2.06	Methanesulfonyl chloride	0.00	0.00	2.39	2.40	11.86	6.54
2.656	Butanal,3-methyl	0.00	0.00	0.00	0.00	1.81	0.00
2.704	Butanal 2-methyl	0.00	0.00	0.00	0.00	1.93	0.00
2.739	Benzene	7.94	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
2.946	1-Heptene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	14.61
4.093	Toluene	29.91	3.77	8.85	7.82	11.09	8.08
4.529	2-Octene	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.58
5.258	Cyclotrisiloxane hexamethyl	11.53	6.98	8.22	6.42	15.93	13.38
5.571	Furfural	0.00	0.00	0.00	0.00	89.12	0.00
6.4	Ethyl benzene	9.62	2.08	5.15	3.97	6.20	4.60
6.597	o-Xylene	33.66	7.38	14.08	12.35	22.06	17.05
7.336	p-Xylene	5.92	2.15	2.21	1.31	62.30	24.01
8.837	1-R-α-Pinene	18.12	6.63	11.22	9.27	6.07	8.04
9.907	Benzaldehyde	0.00	0.00	0.00	0.00	19.04	0.00
9.951	Benzene,1-ethyl-3-methyl	6.64	2.45	4.21	5.13	0.00	7.61
10.085	2-Furancarboxaldehyde, 5-methyl	0.00	0.00	0.00	0.00	31.13	0.00
10.845	α-Methylstyrene	0.00	13.36	0.00	0.00	0.00	0.00
11.093	3-Heptanone, 5-methyl	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.31
11.303	Benzene,1,3,5-trimethyl	7.41	2.22	6.02	6.30	8.41	5.02
11.63	Decane	4.27	2.24	4.54	6.22	11.79	6.05
11.79	Cyclotetrasiloxane octamethyl	12.52	5.53	7.32	7.62	10.99	7.12
11.878	3-Heptene,2,2,4,6,6-pentamethyl	0.00	17.09	2.01	2.96	5.73	2.51
12.861	D-Limonene	23.57	25.33	34.03	32.15	49.62	24.73
12.972	1-Hexanol, 2-ethyl	3.51	1.45	1.25	2.54	12.18	5.13
13.596	Benzeneacetaldehyde	0.00	0.00	0.00	0.00	8.12	0.00
14.685	Acetophenone	0.00	0.00	0.00	0.00	8.44	2.65
14.953	Octane,1-ethoxy	0.00	0.00	0.00	0.00	11.12	3.96
15.508	Benzenemethanol,α,α-dimethyl	0.00	0.00	0.00	0.00	7.02	2.76
16.265	Undecane	1.94	0.00	2.11	2.78	7.16	3.69
16.488	Nonanal	0.00	0.00	5.39	7.96	34.31	10.33
18.248	Methanesulfonamide,N,n-hexyl	0.00	3.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19.22	Cyclopentasiloxane decamethyl	36.80	22.61	22.49	27.74	45.57	27.21
20.943	Dodecane	1.13	0.64	3.76	4.04	21.76	6.90
21.157	Decanal	0.00	0.00	0.94	1.24	7.10	2.17
22.011	Cyclohexane, isothiocyanato	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00
22.666	Caprolactam	0.00	0.00	3.34	1.99	100.00	28.73
23.901	Tridecane	0.00	1.26	3.31	3.41	8.15	4.23
24.396	Nonane 2,2,4,4,6,8,8-heptamethyl	1.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
24.615	Cyclohexasiloxane dodecamethyl	4.47	6.06	5.26	6.13	14.02	6.95
25.053	Pentanoic acid,2,2,4-trimethyl-3-hydroxy, isobutyl ester	0.00	0.00	2.00	2.25	10.02	4.39
25.382	Tridecane,3-methyl	0.00	0.00	1.43	1.17	8.18	2.32
25.491	Propanoic acid,2-methyl, 3-hydroxy-2,4,4-trimethylpentylester	2.14	4.42	4.08	4.70	14.93	7.10
25.932	Tetradecane	2.32	3.39	6.16	7.34	24.98	9.11
26.77	2,4,4-trimethyl,3,4-dihydroquinoline	0.00	5.23	0.00	0.00	0.00	0.00
26.793	1-Decanol,2-hexyl	0.00	0.00	2.14	1.71	12.77	3.37
27.569	Cycloheptasiloxane tetradecamethyl	1.76	3.68	4.89	6.39	12.44	6.41
27.807	Phenol 2,4-bis(1,1-dimethylethyl)	0.00	0.00	0.79	0.89	6.82	1.49
27.851	Butylated hydroxytoluene	0.00	0.00	0.62	0.26	8.28	1.15
28.995	Hexadecane	0.63	1.98	2.52	3.93	6.79	4.12
29.039	Pentanoic acid,2,2,4-trimethyl-3-carboxyisopropanyl isobutylester	0.84	1.51	1.81	1.90	7.86	3.78
29.668	Decanoid acid, decylester	0.00	0.00	0.00	0.00	20.67	7.56
29.91	Cyclotrasiloxane hexadecamethyl	0.00	2.33	1.53	2.20	4.01	1.88
30.027	2-(4a,8-Dimethyl-6-oxo-1,2,3,4,4a,5,6,8a-octahydro-naphthalen-2-yl) propionaldehyde	1.81	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00
31.765	Cyclononasiloxane octadecamethyl	0.00	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 10. Resumen de compuestos emitidos por *Penicillium chrysogenum*.

TR	COMPUESTO	Penicillium 8 días (1h)
1.966	Oxirane trimethyl	12.54
2.946	1-Heptene	14.61
4.529	2-Octene	4.58
11.093	3-Heptanone, 5-methyl	5.31

Leyenda referente a la abundancia de los compuestos	
	≤5.0E+05
	Entre 5.0E+05 y 1.0E+06
	≥1.0E+06

Figura 11. Cuadro con compuestos emitidos únicamente por *Penicillium* de ocho días de crecimiento.

Emisión de COV por Fusarium verticillioides

Se han repetido los ensayos empleando los mismos plásticos descritos para contrastar resultados. Asimismo, se utilizó un **reactor de vidrio**, placas de Petri de vidrio DUROPLAN® para minimizar emisiones. El muestreo fue pasivo de 10 días.

Los resultados obtenidos con el reactor de vidrio mostraron una bajada en la emisión de COV por parte de los elementos del sistema de muestreo.

La figura 12 refleja el cuadro que recoge los compuestos relacionados con el metabolismo de *Fusarium verticillioides*. En este caso los COV relacionados con mayor probabilidad con el hongo fueron: 1-Butanol, 3-methyl, 1-Butanol, 2-methyl y 1H-3a,7-Methanoazulene,2,3,4,7,8,8a-hexahydro3,6,8,8-tetramethyl [3R(3 α ,3a β ,7 β ,8a α)]. Estos compuestos aparecen como denominador común en la mayoría de los muestreos e igualmente se presentan en diferentes estados de crecimiento del hongo.

Tal como muestra la figura 12, los compuestos caracterizados para *Fusarium* en una primera etapa fueron:

- 1-Butanol, 3-methyl.
- 1-Butanol, 2-methyl.
- 1H-3a,7-Methanoazulene,2,3,4,7,8,8a-hexahydro 3,6,8,8-tetramethyl [3R(3 α ,3a β ,7 β ,8a α)].

Recientes muestreos con *Fusarium verticillioides* con 13, 6 y 3 días de exposición de tubos Tenax mediante muestreos pasivos indican la presencia de 1-Butanol, 3-methyl y de 1-Butanol, 2-methyl, mientras que el tercer compuesto anteriormente indicado precisa de un muestreo mínimo de seis días, no apareciendo en el de tres días. También se confirma cyclopentanone en muestreo de tres días. Al igual que ocurre con el 1-Butanol, 3-methyl, acetate; Benzene, 1-ethyl, 4 methoxy; y Spiro[4.5]dec-7-ene, 1,8-dimethyl-4-(1-methylethenyl)-,[1S-(1a,4b,5a)]. Por tanto, se dispone de seis compuestos señalizadores de la presencia de *Fusarium verticillioides* a partir de muestreos pasivos con tubos Tenax® de tres días.

En relación con la detección de COV emitidos precozmente por microorganismos podemos concluir:

- La detección de la presencia de los hongos estudiados *Penicillium chrysogenum* y *Fusarium verticillioides* resulta viable mediante el empleo de muestreadores pasivos y su posterior análisis por ATD-GC-MS.
- La identificación precoz exigida obliga a extremar la limpieza y nula emisividad de los materiales a utilizar con objeto de evitar la presencia de falsos positivos.
- Resulta altamente recomendable el empleo de material de vidrio como envoltorio y contenedor de los muestreadores utilizados.
- La emisión de COV por parte de los hongos estudiados se ve modificada en función del estado de desarrollo del hongo.

La detección rápida del desarrollo microbiano a través de biosensores y de los COV emitidos permite poner en marcha decisiones tempranas. Serán, por tanto, herramientas eficaces para la conservación preventiva de los bienes culturales.

ESTUDIO HONGOS PATRIMONIO. Resumen final compuestos emitidos por Fusarium (muestreos reactor vidrio)

TR	COMPUESTO	Splitless					
		Octubre 2015 - Enero 2016					
		PASIVO VIDRIO 13 DÍAS		PASIVO VIDRIO 6 DÍAS		PASIVO VIDRIO 3 DÍAS	
		Fusarium RS (4 placas)	Fusarium RS * (4 placas)	Fusarium RS (4 placas)	Fusarium RS * (4 placas)	Fusarium RS (4 placas)	Fusarium RS * (4 placas)
2.45	Cyclohexane						
3.57 (3.333)	1-Butanol,3-methyl						
3.639 (3.466)	1-Butanol, 2-methyl						
3.992	Cyclopentanone						
4.358	Difluorophosphoric acid						
5.11	Acetic acid						
5.898	1-Butanol, 3-methyl, acetate						
9.484	Heptane 2,2,3,3,5,6,6-heptamethyl						
9.971	Benzene (1-methylethyl)						
11.088	3-Octanone						
16.882 (14.821)	Benzene, 1-ethyl, 4-methoxy						
16.432	Benzene,1-ethenyl, 4-methoxy						
21.046 (18.909)	1-Propanone 1-(1-Cyclohexen-1-yl)						
26.261 (24.708)	1H-3a,7-Methanoazulene,2,3,4,7,8,8a-hexahydro 3,6,8,8-tetramethyl [3R(3a,3aβ,7β,8aα)] (****)						
24.864	1H-3a,7-Methanoazulene, octahydro-3,8,8-trimethyl-6-methylene-, [3R(3a,3aβ,7β,8aα)]						
27.133 (25.609)	Spiro[4.5]dec-7-ene, 1,8-dimethyl-4-(1-methylethenyl)-, [1S-(1α,4β,5α)]-						
26.221	Cuparene						
26.498	β-Guaiene						
26.602	Phenylmaleic anhydride						
27.867	Butylated hydroxytoluene						
27.89	Benzophenone						
27.959	Di-epi-α-Cedrene (estereoisómero de ****)						
28.026	Formic acid, 3,7,11-trimethyl-1,6,10-dodecatrien-3-yl ester						
29.605	Benzene, pentachloronitro						
29.627	Cubenol						
31.056	1,3,6,10-Cyclotetradecatetraene,3,7,11-trimethyl-14-(1-methylethyl)- (S-(E,Z,E,E))						
34.087	[1,1':3', 1''-Terphenyl]-2'-ol						
34.688	4-Phenyldibenzofuran						

COV'S identificados en el informe de octubre de 2015

[*] Duplicado
[2] Código de colores:

Leyenda referente a la abundancia de los compuestos	
	≤5.0E+05
	Entre 5.0E+05 y 1.0E+06
	≥1.0E+06

Figura 12. Resumen de los compuestos emitidos por *Fusarium verticillioides*. Muestreos con reactor de vidrio.

3. Aplicación a vitrinas de anoxia

Una vitrina de anoxia en esencia es un recipiente cerrado herméticamente en el que se ha extraído todo el oxígeno para ser reemplazado por un gas inerte, generalmente nitrógeno de alta pureza y que debe, por tanto, permanecer aislado de la atmósfera circundante. Todos los ensayos expuestos se han realizado sobre vitrinas de aire; sin embargo, el caso de las vitrinas de anoxia plantea dificultades adicionales. Por ello, se planteó utilizar una vitrina de estas características especiales. No obstante, no es algo fácil, ya que las vitrinas de anoxia no son frecuentes, por lo que se decidió construir una.

Con tal fin se contactó con Shin Maekawa, ingeniero medioambiental en el Getty Conservation Institute (GCI) y diseñador de una vitrina de anoxia del tipo pasivo (capaz de funcionar sin depender de ningún tipo de sistema mecánico o eléctrico), quien nos prestó su asesoramiento. Más aún, el GCI donó al IPCE el material para la construcción de vitrinas. Con ese tipo de material, Maekawa había construido las vitrinas de anoxia para las momias reales que se encuentran depositadas en el Museo de Antigüedades Egipcias de El Cairo.

Así pues, contábamos con:

- Elementos estructurales básicos para la construcción de la vitrina, es decir, un conjunto de perfiles y sus componentes de ensamblaje con los que construir los marcos que serían las aristas de su parte acristalada.
- El asesoramiento del propio diseñador de este tipo de vitrinas.
- La amplia experiencia del laboratorio de biología del IPCE trabajando con burbujas de anoxia, incluyendo las dedicadas a grandes formatos. Además, se contaba con la colaboración del laboratorio del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS), que también aplica de forma habitual técnicas de anoxia.

El MNCARS acordó que la vitrina de anoxia construida sirviera para albergar una obra de Dalí, *Objeto surrealista*, consistente en un conjunto de «objetos encontrados» y ordenados por el artista, entre los que se encontraba un guante de chocolate envuelto en una lámina de estaño, cuya conservación resultaba en extremo complicada. De hecho, en el MNCARS ya se habían realizado con éxito algunos ensayos piloto consistentes en almacenar muestras de chocolate en bolsas de anoxia.

Diseño

Shin Maekawa (1998) publicó la obra *Oxygen Free Museum Cases* en la que describe con detalle las características de su vitrina y cómo construirla. También incluye varios ejemplos de adaptación del diseño a casos concretos. No vamos a repetirlos. Sin embargo, sí es importante saber que todas las vitrinas deben contar con una serie de elementos estructurales mínimos, que deben adaptarse a las necesidades de cada caso, estando marcadas estas necesidades, básicamente, por tres aspectos:

- Las condiciones medioambientales del lugar (principalmente rango de temperaturas y fluctuaciones barométricas).
- Los requerimientos estéticos de la institución donde se va a exhibir.
- Las propias características de la obra a albergar (dimensiones y forma en que debe visualizarse).

Por otra parte, los elementos básicos con los que debe contar la vitrina son los siguientes:

- La estructura o campana de vidrio, que posibilita la visión de la obra y en la que deben mantenerse las condiciones de anoxia. Los vidrios se unen mediante presión sobre una junta que apoya en los marcos que forman las aristas de la propia estructura. La presión se ejerce mediante tornillos y es la que asegura la estanqueidad.
- Un conjunto de válvulas. Al menos una de las hojas de la estructura de vidrio debe ser sustituida por una placa técnica (normalmente metálica) en la que se practican las aberturas necesarias (cada una de ellas aislada con un pasamuros o una escotilla) para operar la vitrina. El número de estas varía según los casos. En esta ocasión se contemplaron cinco de tamaño reducido (dos entradas/salidas de gas, un *septum*, otra para conectar un manómetro y la última para dar paso a un sistema de compensación de presiones similar a un fuelle que en adelante denominaremos simplemente «fuelle»); y una de mayor tamaño, suficiente para permitir el paso de una mano, que estaría cerrada por una tapa circular atornillada o escotilla dotada de una junta.
- El propio fuelle mencionado en el punto anterior.
- Una base plana y sólida donde apoyar o albergar todos los elementos anteriores.

En la figura 13 puede verse la estructura clásica, tal como la concibió Maekawa (1998) junto con la estructura resultante de aplicar los condicionantes estéticos específicos del MNCARS. Se representan también los elementos a exhibir quedando fijadas las dimensiones de la campana de vidrio en 130 × 30 × 65 cm.

Con respecto a esto cabe hacer dos observaciones: de un lado, la estructura base va a ser una mesa, similar a otras ya existentes en el MNCARS, en cuyo tablero se practica una

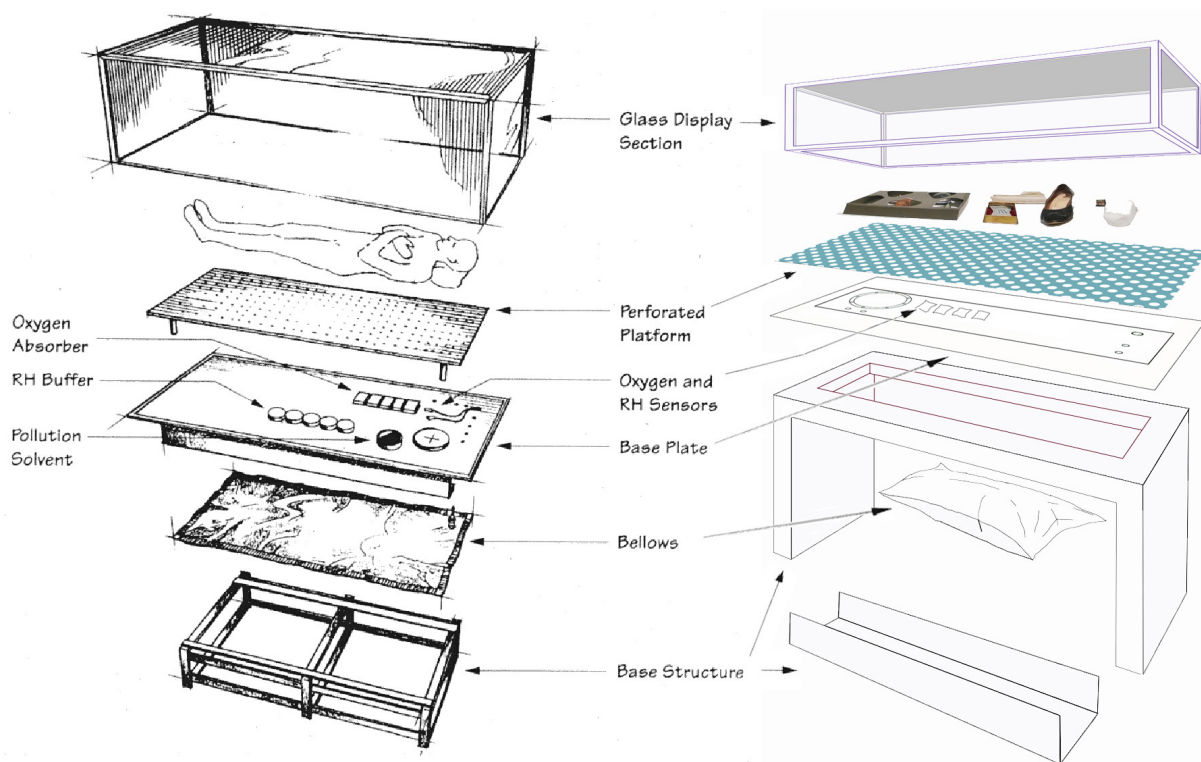


Figura 13. Diseño de la estructura de dos vitrinas de anoxia; a la izquierda, diseño de Maekawa, y a la derecha, diseño realizado para el MNCARS.

abertura rectangular para dar cabida al conjunto de válvulas y aberturas practicadas y conectadas a la base de la estructura de vidrio; se emplearía una chapa plegada similar a un canalón para ocultar el fuelle y cerrar el hueco por debajo. De otro lado, se comprueba cómo en ambos casos se debe dividir el espacio interior de la estructura de vidrio mediante una plancha perforada, de modo que bajo ella y oculta a la mirada del espectador puedan ubicarse los diferentes absorbentes que van a ayudar a regular las condiciones en el interior de la vitrina: absorbentes de oxígeno, carbón activado y gel de sílice.

El gas inerte elegido fue el nitrógeno (N_2), por ser más económico y plantear menos dificultades para su adquisición.

Biosensores en una vitrina de anoxia

Como se ha expuesto, la operativa del biosensor puede resumirse en: se introduce en la vitrina, se deja un tiempo para que se depositen sobre él los contaminantes biológicos presentes, se extrae, se traslada al laboratorio y finalmente se realiza el cultivo correspondiente. La inserción y extracción no plantean mayores problemas en una vitrina de aire, pero en este caso, irremisiblemente supondría la pérdida de las condiciones de anoxia. Por tanto, se plantea la necesidad de resolver esta cuestión introduciendo alguna mejora en el diseño que se detalla a continuación.

El valor umbral de la concentración de oxígeno residual para que la anoxia sea eficiente es considerado por Maekawa 2 %. Las imperfecciones en la construcción de la vitrina obligan a una continua supervisión de esta concentración y a un mantenimiento periódico consistente en restablecer la atmósfera inerte cuando se rebasa el umbral. Maekawa se impone como objetivo en la instalación y puesta a punto que estas acciones se hagan necesarias cada dos años o contemplando períodos aún mayores. Sería en los momentos previos al restablecimiento de la anoxia cuando podría abrirse la escotilla para la sustitución de los absorbentes y cuando podrían reemplazarse también los biosensores. No obstante, la filosofía de «alerta temprana» no casa con estos períodos tan prolongados, por lo que se precisa otra solución.

Finalmente se optó por utilizar el fuelle como vía alternativa. Este elemento no es más que una bolsa termosellada, completamente similar a una bolsa de anoxia, por lo que al fabricarlo es sencillo introducir el biosensor en él. La función del fuelle es evitar que las juntas del vidrio se vean sometidas a algún tipo de estrés por sobrepresiones positivas o negativas, lo que terminaría traduciéndose en filtraciones. La idea es que al ser la estructura de cristal rígida y hermética, en condiciones de temperatura constante va a mantener una presión constante en el interior. Como la presión barométrica en el exterior varía a lo largo del año, va a existir siempre una presión diferencial entre el interior y el exterior. De otra parte, las fluctuaciones de la temperatura, en un volumen constante, se traducirían en fluctuaciones de presión sobre las mismas juntas, con idéntico resultado. El fuelle, al ser un elemento de volumen variable en conexión con el interior, está ideado (Toishi y Koyano, 1988: 90-94) para expandirse y contraerse compensando las fluctuaciones anteriores. Es decir, ante un incremento de temperatura, el fuelle procedería a llenarse con el gas del interior, evitando la sobrepresión sobre las juntas; con una bajada de temperaturas tendería a vaciarse pasando su contenido al interior de la vitrina y ante presiones diferenciales respondería de forma similar. Por tanto, la bolsa con este movimiento continuo de inflación y deflación facilitaría la llegada de muestras del gas del interior de la vitrina con toda su carga de contaminantes biológicos hasta el biosensor.

El fuelle atraviesa la base técnica de la campana de vidrio mediante un pasamuros, que puede abrirse y cerrarse mediante una válvula que normalmente está permanentemente abier-

ta. Para sustituir el biosensor habría que sustituir el fuelle y, tal como fue ideado en el diseño original, esto supondría dejar la vitrina abierta con la consiguiente pérdida de anoxia. No obstante, la conexión del fuelle se realiza a través de un tubo, una válvula y un pasamuros, lo que ofrece la posibilidad de un rediseño para permitir una inserción/extracción con pérdidas mínimas.

Finalmente, se adopta la solución representada en la figura 14, en la que se utiliza una doble válvula. Con ello pueden cerrarse simultáneamente ambos elementos (vitrina y fuelle) y proceder a su separación sin entrada de aire en ninguno de los dos. De igual manera puede insertarse un nuevo fuelle, que de forma previa se habría llenado parcialmente con nitrógeno y en el que se habría introducido el nuevo biosensor pudiéndose transportar cerrado, sin que se produjera contaminación apreciable de oxígeno.

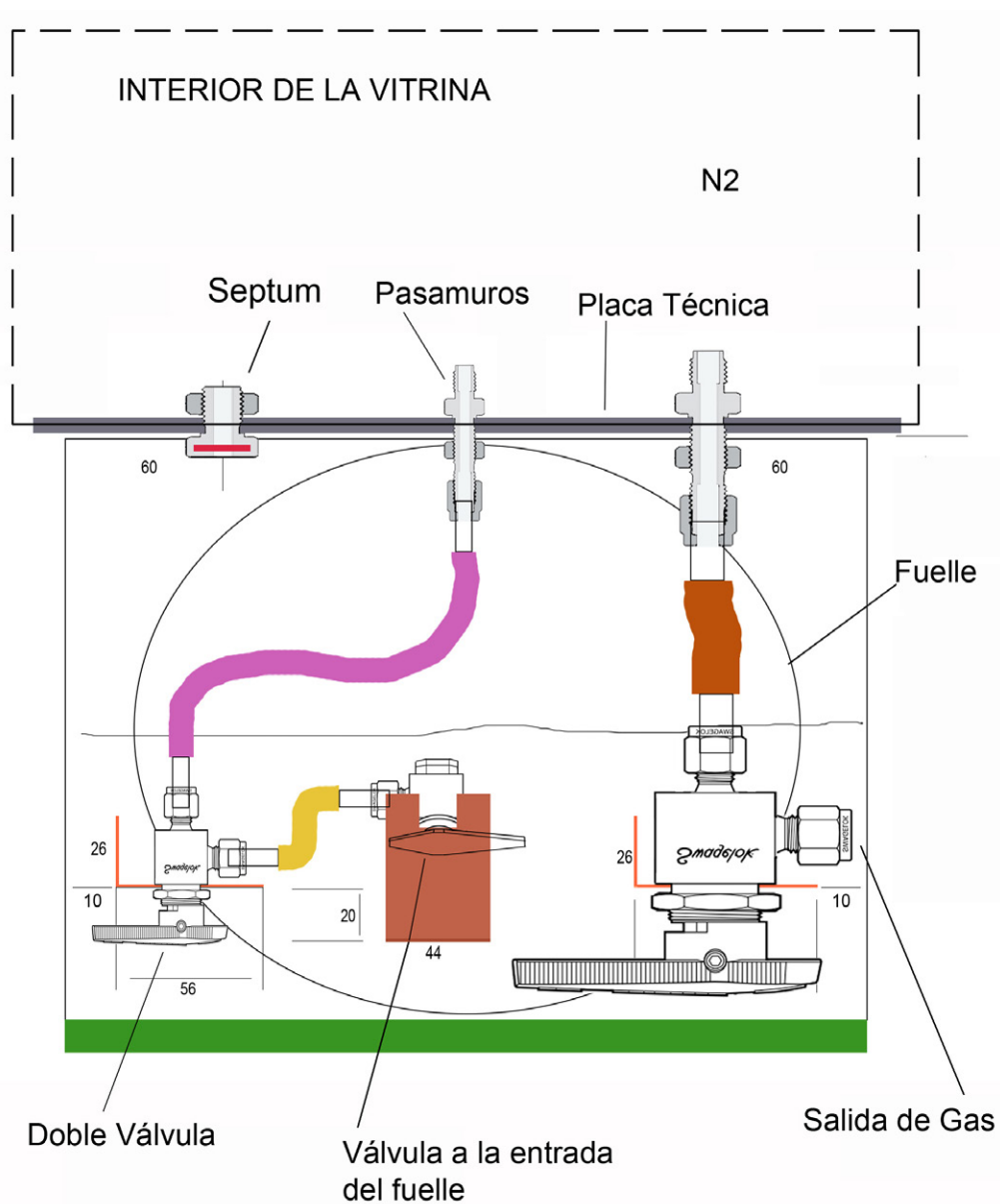


Figura 14. Detalle del diseño de la doble válvula para conectar el fuelle con el interior de la vitrina.

El número de veces que podría reemplazarse un biosensor entre dos mantenimientos de la vitrina va a depender de la contaminación de oxígeno que se produzca con cada reemplazo. La posible contaminación de oxígeno se limitaría al existente en el volumen de aire contenido en el tubo que une ambas válvulas (en amarillo en la figura 14). Por ello conviene hacer unos números con el fin de cuantificar su impacto. Pues bien, el volumen de la vitrina (Vv) es de:

$$Vv = 130 \times 30 \times 65 = 253\,500 \text{ cm}^3$$

La longitud del tubo es de 6,6 cm con un diámetro interior de 0,64 cm, lo que hace un volumen (Vt) de:

$$Vt = 6,6 \times 0,32^2 \times 3,14 = 2,12 \text{ cm}^3$$

Dado que el contenido en oxígeno de la atmosfera es del 21 %, este volumen equivaldría a un volumen de oxígeno en el tubo (Vto) de:

$$Vto = 0,44 \text{ cm}^3$$

Por tanto, se puede estimar para esta vitrina en concreto que cada inserción/extracción de un fuelle supondría una contaminación de oxígeno (Vc) de:

$$Vc = (Vto / Vv) \times 10^6 = 1,74 \text{ ppm}$$

Con este dato y considerando el umbral de la anoxia funcional del 2 % (es decir, de 20 000 ppm), se concluye que en una vitrina ideal podrían realizarse más de 10 000 sustituciones de biosensor.

Hay otros dos factores a tomar en cuenta. En primer lugar, la concentración residual de oxígeno que queda después de practicada la carga inicial de anoxia, y en segundo lugar, las pérdidas a través del resto de los elementos de la vitrina. En el momento de escribir este artículo, aún no se ha completado la carga inicial definitiva de la vitrina y de momento no se ha podido estimar la pérdida antes mencionada, pero tomando los valores considerados como normales por Maekawa (1998), 1000 ppm y 5 ppm/día respectivamente, el margen del que dispondríamos dentro del intervalo de dos años entre mantenimientos sería de:

$$\text{Margen} = 20\,000 - [1000 + (730 \times 5)] = 15\,350 \text{ ppm}$$

Que a razón de 1,74 ppm por cada sustitución, nos permitiría realizar hasta 8821 sustituciones, es decir, podríamos cambiar el biosensor diez veces al día durante dos años, sin que esto afectara de forma significativa a la operativa de la vitrina.

La frecuencia con que se debe sustituir un biosensor varía, pero en cualquier caso se mediría en meses y no en días, por lo que se concluye que este método es útil para compatibilizar anoxia y biosensores.

A partir de los resultados globales obtenidos en el presente artículo, se ha elaborado un documento técnico que muestra las recomendaciones básicas para la construcción de vitrinas destinadas a la exposición de objetos delicados de naturaleza orgánica (Herráez *et al.*, 2016).

4. Bibliografía

- HERRÁEZ, I.; HERRÁEZ, J. A.; VALENTÍN, N.; DURÁN, D., y LAFUENTE, D. (2016): *Recomendaciones básicas para la construcción de vitrinas destinadas a la exposición de objetos de naturaleza orgánica*. Proyecto PNIC. Vitrinas, n.º PNIC2015/01. Instituto del Patrimonio Cultural de España.
- JOBLIN, Y.; MOULARAT, S.; ANTÓN, R.; BOUSTA, F.; ORIAL, G.; ROBINE, E.; PICÓN, O., y BOUROUINA, T. (2010): «Detection of molds by volatile organic compounds: Application to heritage conservation». *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64: 210-217.
- LARSEN, T., y FRISVAD, J. C. (1995). «Characterization of volatile metabolites from 47 *Penicillium* taxa». *Mycol. Res.*, 99 (10): 1153-1166.
- MAEKAWA, S. (1998): *Oxygen-free museum cases*. Research in Conservation. The Getty Conservation Institute.
- TOISHI, K., y KOYANO, M. (1988). *The conservation of Far Eastern art: preprints of the contributions to the Kyoto Congress*, 19-23 September, pp. 90-94.
- US EPA (1999): Compendium method TO-17 determination of volatile organic compounds in ambient air using active sampling onto sorbent tubes. U.S. Environmental Protection Agency. EPA/625/R-96/010b.
- VALENTÍN, N. (2015): «Biosensores como sistemas de alarma para detectar riesgos de biodeterioro en restos momificados. Estudios preliminares». *Boletín Museo Arqueológico Nacional*, 33: 347-354.
- VALENTÍN, N.; MURO, C., y MONTERO, J. (2010): *Métodos y Técnicas para Evaluar la Calidad del Aire en Museo: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía*. Ed. CARS-IIC Grupo Español, pp. 63-81.

Nanomateriales antimicrobianos para la preservación del patrimonio cultural

Scott G. Mitchell, Sara Rivera-Fernández y Jesús M. de la Fuente

Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (ICMA). Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Universidad de Zaragoza (CSIC-UNIZAR)
scott@unizar.es

Resumen: Los microorganismos son capaces de crecer e inducir la descomposición de papel, cuero, piedra, pinturas y materiales textiles y generan graves problemas para la conservación de nuestro patrimonio cultural. Los riesgos asociados para la salud, junto con el coste que supone la descontaminación de objetos infectados, salas de exposición y depósitos, hacen que este sea un tema prioritario para los museos y las autoridades locales. Este proyecto exploratorio producirá, por un lado, nanomateriales fotosensibles modulares, y por otro, moléculas superhidrofóbicas, ofreciendo una oportunidad única para producir biocidas de precisión que satisfagan las necesidades de la conservación del patrimonio cultural. Aquí detallamos su desarrollo y los resultados preliminares obtenidos durante el primer año de este proyecto. Durante los próximos dos años procederemos a testar estos materiales usando un programa de cribado funcional antimicrobiano donde se evaluará su actividad frente a cepas de bacterias y hongos que habitualmente se encuentran infectando diversos objetos del patrimonio cultural, culminando con la evaluación de los candidatos más eficaces en muestras reales.

Palabras clave: Nanopartículas, polioxometelatos, materiales nanoestructurados, materiales antimicrobianos, microbiología.

Abstract: Microorganisms can proliferate and induce decomposition of paper, leather, stone, paints and textiles and create serious problems for the preservation of our cultural heritage. The associated risks to health, along with the cost of decontamination of infected objects, showrooms and warehouses make this a priority issue for museums and local authorities alike. This exploratory project will produce modular photosensitive nanomaterials as well as superhydrophobic molecules, offering a unique opportunity to produce precision biocides that meet the needs of conservation of cultural heritage. Here we detail our preliminary results obtained during the first year of this project. During the next two years, we will test these materials using a functional antimicrobial screening program where their activity will be assessed against strains of bacteria and fungi commonly found infecting objects of cultural heritage culminating in the evaluation of the most effective candidates in real samples.

Keywords: Nanoparticles, polyoxometalates, nanostructured materials, antimicrobial materials, microbiology.

Introducción

Los microorganismos, como bacterias, hongos y mohos, inducen problemas importantes en la conservación del patrimonio cultural (Sterflinger y Piñar, 2013: 9637-9646). La contaminación microbiana provoca graves daños en diversos objetos, como es el debilitamiento o desprendimiento de papel, el *foxing*, la contaminación de los libros de cuero, armas, ropa y la decoloración en general (Strzelczyk, 2004: 151-156). Por otra parte, los hongos causan problemas serios en el biodeterioro de telas y textiles (Baglioni *et al.*, 2012: 42-53). También los monumentos de piedra, las esculturas y las fachadas de edificios son altamente susceptibles a la contaminación microbiana, lo que resulta en el desprendimiento de las capas de pintura, así como la formación de cavidades, conduciendo a la destrucción de la estructura y el valor estético (Dakal y Cameotra, 2012: 36). La prevención de la proliferación microbiana es esencial para la preservación de objetos históricos en edificios públicos, museos y colecciones privadas, ya que nuestro patrimonio cultural compartido es un recurso social, económico y medioambiental de gran importancia a nivel europeo (Florian, 1997). El biodeterioro no solo incurre en grandes gastos, sino que además muchas bacterias u hongos tóxicos y alérgenos pueden amenazar seriamente la salud de los trabajadores y visitantes de los museos, archivos y bibliotecas (Flannigan y Miller, 1994: 3-28). Es bien sabido que las capas de polvo que cubren los diferentes objetos portan un alto número de esporas de hongos y bacterias (y también sirven como nutrientes para los microorganismos); sin embargo, las medidas de limpieza habituales a menudo son descuidadas. Aunque la prevención de daños biogénicos de objetos históricos se basa principalmente en el control eficaz sobre las condiciones ambientales, la limpieza frecuente y el monitoreo fenomenológico (Sterflinger, 2010: 47-55), otros factores como la resistencia adquirida a los antimicrobianos mitigan la necesidad de tener disponible una amplia gama de biocidas adecuados. Pero, lamentablemente, solo hay disponible una gama limitada de métodos físicos y químicos para la desinfección del daño microbiológico reciente y progresivo (Allsopp, Seal y Gaylarde, 2004). Los métodos químicos incluyen biocidas líquidos y fumigación con gases, pero la elección está limitada por la «Biocidal Products Directive» de la Unión Europea y los productos químicos disponibles se limitan aún más debido a la compatibilidad limitada de estos con los materiales históricos, tales como pigmentos, aglutinantes orgánicos o papel; los cambios de color son algunos de los efectos resultantes de la degradación de estos materiales ocasionados por estos tratamientos (Paulus, 2004). Este pequeño número de tratamientos compatibles con los materiales a tratar supone un nuevo reto en la búsqueda de soluciones concretas. Otro problema añadido es que la mayoría de objetos se encuentran infectados por una comunidad mixta de microorganismos con niveles muy diferentes de susceptibilidad hacia el compuesto químico. Resumiendo, el efecto acumulativo de los diversos microorganismos, la resistencia a los antimicrobianos, la falta de tratamientos efectivos disponibles y la naturaleza altamente sensible de objetos históricos implica que es necesario identificar y estudiar exhaustivamente nuevos agentes microbicidas para solucionar el problema específico de la conservación del patrimonio cultural.

A día de hoy pueden ser diseñadas amplias bibliotecas de nanomateriales con diversidad de tamaños y formas y diferentes propiedades químicas y superficiales (Xia *et al.*, 2009: 60-103). Es importante destacar que el campo de la nanotecnología sigue experimentando un rápido crecimiento, proporcionando nuevos materiales para completar los ya conocidos. El interés en las propiedades y la manipulación de las nanopartículas (NP) se ha incrementado drásticamente en los últimos años (Guerrero-Martínez, Grzelczak y Liz-Marzán, 2012: 3655-3662), siendo aplicadas en campos tan diversos como la catálisis (Corma y García, 2008: 2096-2126) o la medicina (Lin, 2015: 10407-11190). Los polioxometalatos (POM) son una importante y diversa clase de óxidos de metales moleculares en la nanoes-

cala, que se caracterizan por una amplia y versátil gama de propiedades físico-químicas (Cronin y Müller, 2012: 7333-7334). Sus características redox y su alta actividad de oxidación permiten su uso en una amplia variedad de aplicaciones, desde catálisis (Streb, 2012: 1651-1659) a medicina (Yamase, 2005: 4773-4782). Mientras estos dos tipos de materiales poseen notables propiedades por sí mismos, la combinación de múltiples materiales funcionales hace posible el desarrollo de nanomateriales híbridos modulares, donde las propiedades físico-químicas fundamentales de cada componente pueden ser adaptados o mejorados para satisfacer las exigencias de una aplicación específica (Mitchell y M. de la Fuente, 2012: 18091-18100).

Las excepcionales propiedades ópticas y redox de las NPs y los POM, respectivamente, pueden utilizarse para diseñar agentes biocidas altamente eficientes (De Matteis, Mitchell y De la Fuente, 2014: 7114-7117). De esta manera, podrían utilizarse diversos modos complementarios y no específicos de acción antimicrobiana de forma simultánea desde una fuente, o adaptarlo para actuar contra un microorganismo en particular. A día de hoy se conocen materiales nanohíbridos basados en POM y NP, pero los ejemplos son limitados y han sido aplicados casi exclusivamente en el campo de la catálisis. Hemos propuesto un programa de proyección funcional para la generación de sistemas antimicrobianos nanohíbridos dirigido a evitar el deterioro del patrimonio cultural, sin alterar significativamente la integridad del objeto de interés.

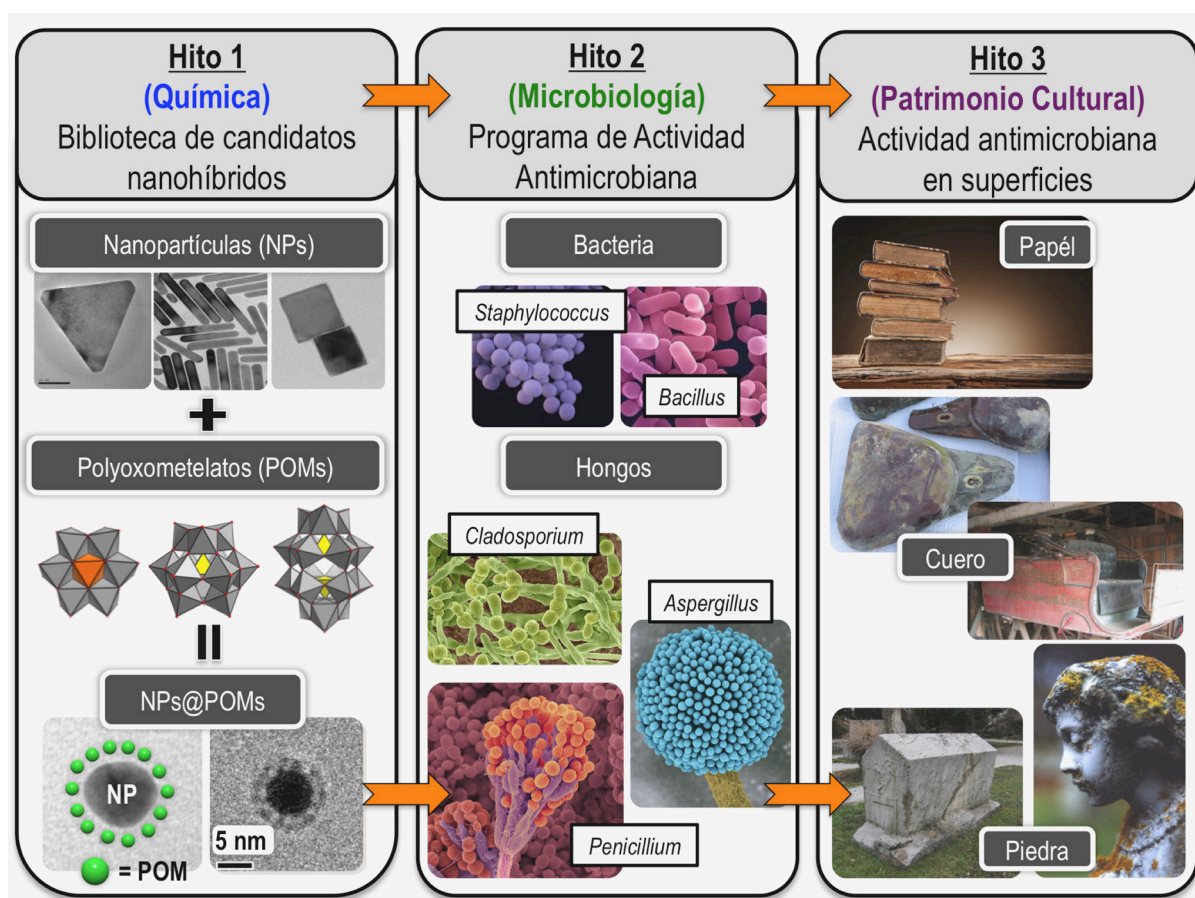


Figura 1. El reto principal de este proyecto es la conservación de objetos de patrimonio cultural usando nanomateriales híbridos como agentes antimicrobianos.

La propuesta científica innovadora viene de la utilización de nanomateriales inorgánicos híbridos como antimicrobianos para la conservación del patrimonio cultural. La metodología para alcanzar los objetivos finales de esta investigación se define por tres objetivos específicos realizados de forma consecutiva. El primer objetivo se centra en sintetizar y caracterizar los candidatos nanohíbridos, tal vez expandiendo la biblioteca de candidatos para el proyecto. Posteriormente, el segundo objetivo trata de implementar el programa de detección de antimicrobianos de los candidatos nanohíbridos más relevantes para identificar los materiales híbridos antimicrobianos más eficaces y profundizar en su mecanismo de acción. Estos resultados facilitarán la selección de los candidatos más apropiados para el tercer objetivo, donde serán probados en superficies caseras para analizar la eficacia antimicrobiana de los materiales en superficies contaminadas con microorganismos, antes de hacer pruebas en muestras reales.

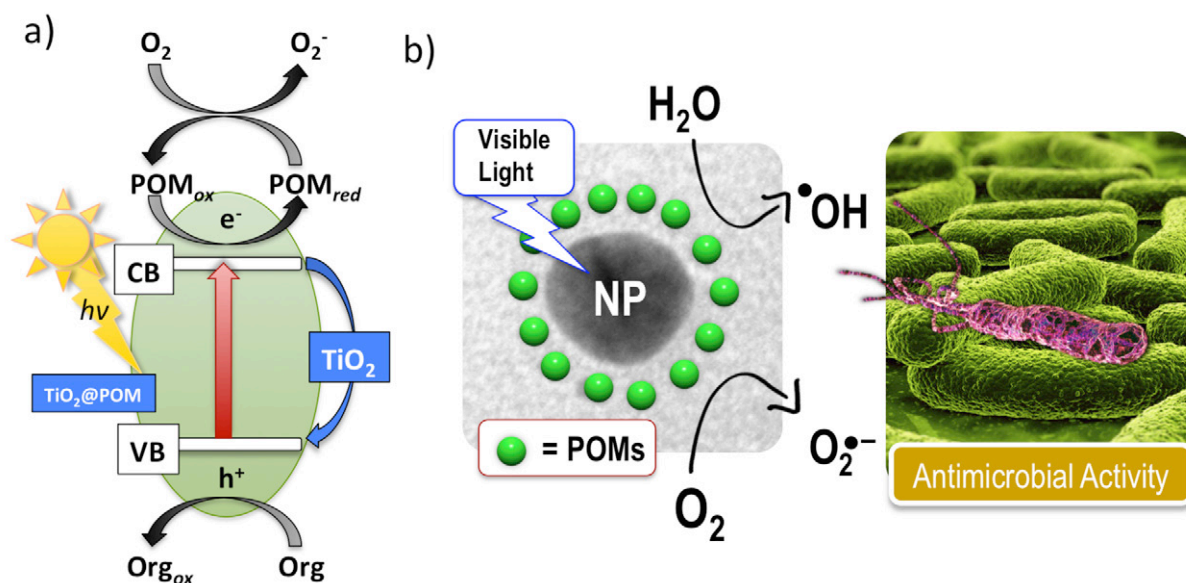
Resultados

Materiales híbridos fotocatalíticos con luz visible

Debido a su fotoestabilidad y bajo coste, la anatasa (dióxido de titanio, TiO_2) ha demostrado ser el fotocatalizador más utilizado en los últimos años, ofreciendo una alta eficiencia de conversión de energía de la luz (Fujishima, Hashimoto y Watanabe, 1999). Ha habido varios ejemplos de fotocatalizadores que constan de un heteropolíácido anclado sobre el TiO_2 (Yanagida *et al.*, 2008: 3757-3764). En estos materiales binarios se observó un efecto sinérgico entre los dos componentes, y la mejora de su rendimiento con respecto a los materiales primarios se atribuyó al retraso de la recombinación electrón-hueco (figura 2a) (Marcia *et al.*, 2009: 497-506). Los POM y materiales híbridos basados en ellos son agentes fuertemente oxidantes, empleados en catálisis homogénea u heterogénea, que en su estado excitado (fotoexcitación) pueden oxidar el agua, produciendo radicales hidroxilo ($\text{HO}^\bullet$). En presencia de O_2 , la fotosensibilización del POM podría generar superóxido (O_2^-) y/o oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$).

De este modo diseñamos específicamente materiales basados en óxido de titanio decorado con polioxometelatos ($\text{TiO}_2@\text{POM}$) para producir especies reactivas de oxígeno (ROS) con el objetivo de dañar la membrana celular de las bacterias y hongos para inducir su muerte celular de manera inespecífica (figura 2b).

Para el funcionamiento correcto de este sistema se busca una dispersión homogénea de los POM en la superficie de la nanopartícula de TiO_2 , y que la partícula híbrida tenga una alta absorbancia en la región visible del espectro electromagnético. Los esfuerzos actuales van enfocados en anclar los POM $\{\text{PW}_{12}\}$ y $\{\text{SiW}_{12}\}$ y sus derivados al TiO_2 . Como las interacciones electroestáticas son débiles y pueden dar lugar a la liberación del POM con el paso del tiempo, se están investigando varias maneras de hacer esa unión de manera covalente, utilizando los POM $\{\text{PW}_{11}\}$ y $\{\text{SiW}_{11}\}$ porque presentan sitios vacantes (la ausencia de un átomo de W en su estructura). De esa manera se pueden situar otros metales de transición en su sitio. Nosotros buscamos una unión covalente $\{\text{Ti-O-W}\}$ entre el POM y el TiO_2 . Una imagen de microscopio electrónico de transmisión ejemplar se puede ver en la figura 3, donde se aprecia tanto el núcleo del TiO_2 como el recubrimiento de POM.



Figuras 2a y 2b. a) Mecanismo de fotodegradación bajo luz visible de compuestos orgánicos (Org) resultado de un efecto sinérgico de POM y TiO_2 en un material híbrido $\text{TiO}_2@\text{POM}$, y b) especies de radicales de oxígeno (ROS) generados por este mismo sistema que puedan dañar la membrana plasmática de los microbios, provocando su muerte mediante un mecanismo inespecífico.

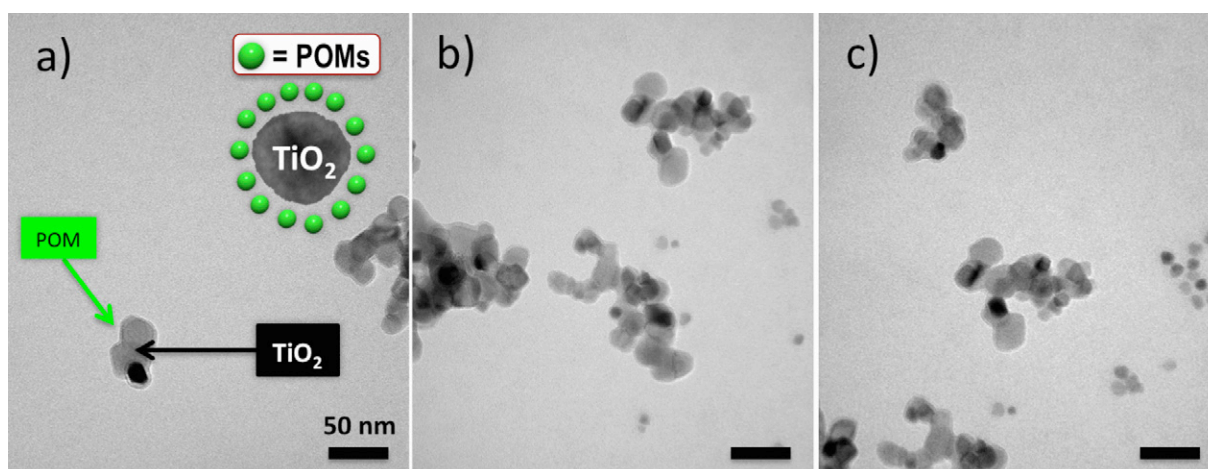


Figura 3. Imágenes de microscopio electrónico de transmisión (TEM) de las partículas híbridas de $\text{TiO}_2@\text{POM}$. Se distingue un núcleo de TiO_2 con recubrimiento de POM.

Reactividad ROS mediante métodos colorimétricos

Con el método colorimétrico descrito a continuación se pretende determinar la formación en medio acuoso de especies reactivas de oxígeno (ROS) producidas por estos materiales híbridos después de irradiación UV-vis. Para ello se usa una muestra de nanopartículas de TiO_2 de diámetro de 21 nm recubiertas con POM; en este caso mostramos un ejemplo usando el anión Keggin $\text{K}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$ (en adelante $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{12}$). Sobre la muestra (un polvo blanco, insoluble en medio acuoso) se añade una disolución acuosa de Rodamina B (Rodamina tatraetilada, en adelante RhB) en concentración 0,17 mM. Se mezcla con vortex y la suspensión se deja bajo irradiación durante distintos períodos de tiempo, hasta un máximo de 24 h. Al finalizar cada uno de los tiempos de irradiación estipulados, se centrifugaron las suspensiones para recuperar el sobrenadante libre de las $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{12}$ para realizar las medidas de absorbancia. Se mi-

dieron los espectros de absorbancia de los sobrenadantes entre 300 nm y 700 nm de longitud de onda en un lector de placas.

Los espectros obtenidos mostraron, por un lado, una disminución de la intensidad en la absorbancia y, por otro, un desplazamiento de la longitud de onda del máximo de absorbancia característico de la RhB (554 nm) (figura 4a). La disminución en la intensidad de la absorbancia puede ser atribuida a procesos de adsorción superficial (por interacciones iónicas, puentes de hidrógeno, etc.) de las moléculas de RhB sobre la superficie de las TiO_2 NPs. Estas adsorciones superficiales provocarían la agregación de las partículas del colorante, y de ahí la disminución en la intensidad de la absorbancia de la disolución (MA *et al.*, 2012: 116-125). Por otro lado, el desplazamiento de la longitud de onda del máximo de absorbancia hacia longitudes de onda menores es indicativo de la degradación oxidativa de las moléculas de RhB. Al aumentar el tiempo de incubación, se va viendo cómo el máximo de absorbancia se va desplazando a longitudes de onda menores (figura 4a), lo que corresponde a las distintas especies de degradación de la RhB (Watanabe, Takizawa y Honda, 1997: 1845-1851; Peng, Mingming y Zhongai, 2014: 308-316). La deetilación parece ser escalonada y por etapas, como muestra la figura 3b, perdiendo un grupo etilo en cada una de ellas. Esta degradación tendría lugar si en el medio de incubación se formaran radicales ROS, siendo los mayoritarios los radicales peróxido e hidróxilo. Debido al marcado carácter oxidante de estas especies, provocarían la reducción de la RhB a Rodamina. Las longitudes de onda de los máximos de absorbancia encontrados experimentalmente se corresponden bien con los datos en bibliografía (Zhang y Zhu, 2005: 3537-3545).

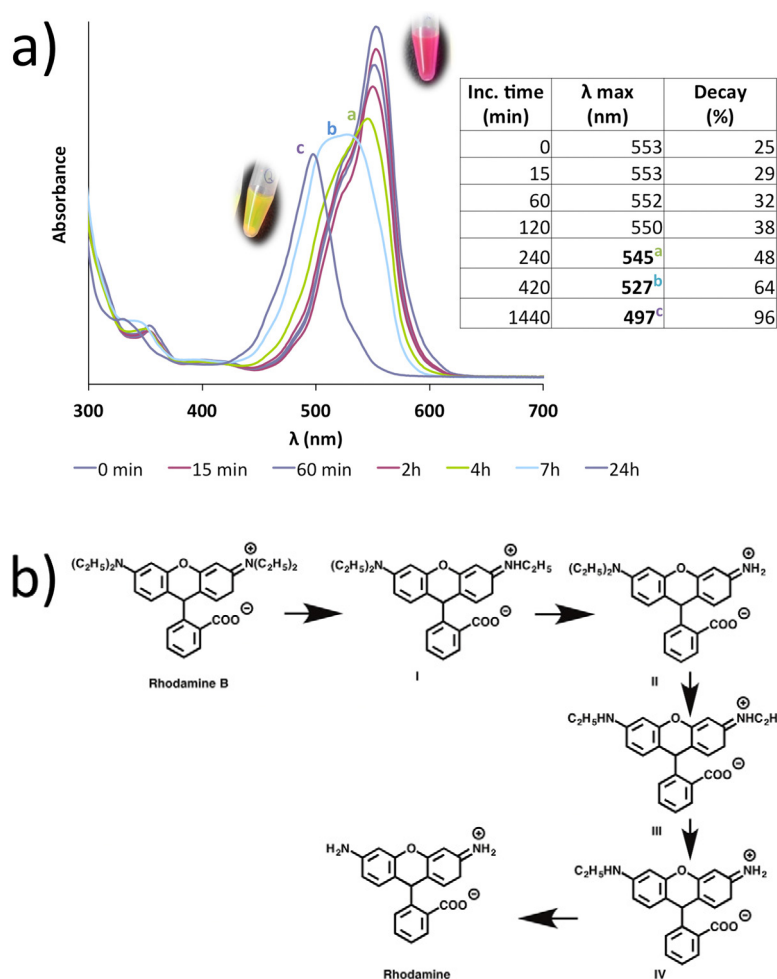


Figura 4a y 4b. a) Espectro de absorbancia de la suspensión de RhB 0.17 mM tras distintos tiempos de incubación con $\text{TiO}_2/\text{SiW}_{12}$ bajo irradiación, mostrando la degradación de Rodamina B a Rodamina. b) Esquema de degradación de la Rodamina B, con las especies intermedias a. N,N,N'-tri-etil rodamina, b. N,N'-di-etil rodamina c. N, N'-di-etil rodamina d. N-etil rodamina e. rodamina (Peng, Mingming y Zhonghai, 2014: 308-316).

Reactividad ROS por métodos fluorimétricos

Con el método fluorimétrico descrito a continuación se pretende determinar especies reactivas de oxígeno en medio acuoso. Para ello se probaron las mismas nanopartículas de $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{12}$ utilizadas para el método colorimétrico. La única variación del protocolo es el uso de una disolución acuosa de RhB en concentración 0,025 mM. Las disoluciones acuosas de RhB tienen un pico de emisión característico a 570 nm cuando la muestra es excitada en torno a 500 nm. Al tiempo que las moléculas de RhB se degradan, perdiendo los grupos etilo de los amino presentes en la molécula, el pico de emisión a 570 nm desaparece, apareciendo un nuevo pico de emisión a 530 nm, que podría corresponder a la emisión de la excitación de las moléculas de rodamina. Como se puede observar en el espectro mostrado en la figura 5, el nuevo pico de emisión sufre también una pequeña desviación del máximo de emisión. El rango de longitudes de onda va desde 535 nm en el primer pico observado a 520 nm en el último medido. Puede ser indicativo de las distintas especies intermedias de degradación a medida que la molécula de rodamina B inicial va perdiendo los grupos etilo unidos a los grupos amino.

Reactividad ROS por resonancia paramagnética electrónica (EPR)

Para profundizar y tener una caracterización aún más específica se procedió a analizar los ROS usando resonancia paramagnética electrónica (EPR). Como una breve introducción, las especies ROS pueden reaccionar o ser capturadas por una molécula spin-trap. Para distinguir un origen u otro, se pueden utilizar *scavengers* de $\text{HO}^\bullet$ (MeOH, EtOH) o del $^1\text{O}_2$ (TEMP). Por otra parte, al ser oxidantes fuertes, también pueden oxidar el 5,5-dimetil-1-pirrolin-N-Oxido (DMPO),

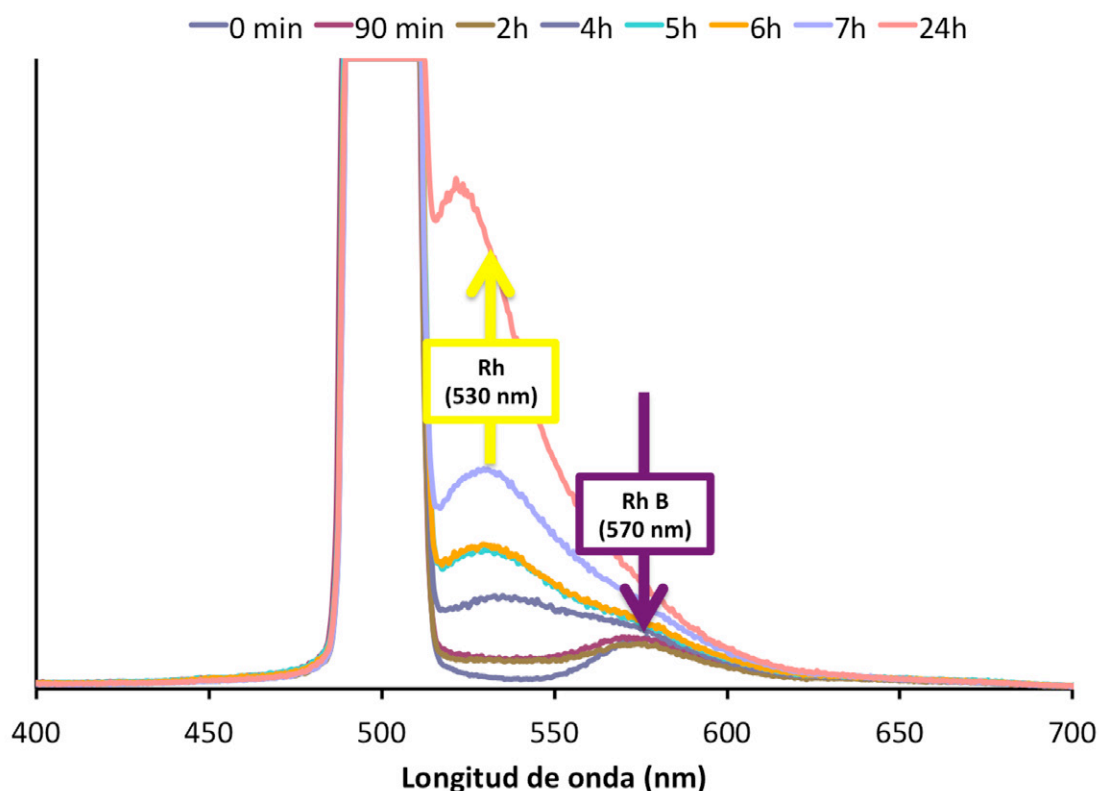


Figura 5. Espectro de emisión de las partículas de $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{12}$ excitando a 500 nm mostrando la degradación de RhB a Rh.

que a través de un ataque nucleófilo también daría el aducto DMPO-OH, o su oxidación a DMPO-X. *N-tert*-butil- α -(2-sulfofenil)nitrona (2-SPBN) también se puede utilizar de la misma manera, mientras 2,2,6,6-tetrametil-4-piperidone (4-oxo-TMP) es un compuesto más específico para la detección del $^1\text{O}_2$. El uso de *scavengers* de $\text{HO}^\bullet$ descarta o corrobora este proceso (cabe tener en consideración que el POM pueda oxidar también al alcohol).

A continuación damos dos ejemplos para destacar las diferencias notables entre TiO_2 y $\text{TiO}_2@\text{POM}$ tras ser irradiado con luz UV-visible. Al irradiar el TiO_2 con luz UV-visible (384-800 nm) da una señal de captura de radicales de $\text{HO}^\bullet$ con 2-SPBN, mientras las muestras de $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{11}$ son claramente más activas que el TiO_2 . Además, después de 12 minutos de irradiación de $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{11}$, se aprecian hasta tres espectros distintos, con tiempos de decaimiento distintos (dos de ellos bastante similares), en diferentes proporciones. Estos espectros se han simulado separadamente. Uno de ellos, el menos estable, que aparece primero y se observa en el TiO_2 , se puede asignar al aducto 2-SPBN-OH, ya que coincide totalmente con el obtenido en un experimento de captura de $\text{HO}^\bullet$ generado por irradiación de H_2O_2 con el 2-SPBN. Los otros dos espectros podrían asignarse a la captura del superóxido ($\text{O}_2^{\bullet-}$), dando posiblemente dos isómeros (entorno ligeramente distinto para cada uno) y algo más estable que el aducto del $\text{HO}^\bullet$. Por el otro lado, en el TiO_2 prácticamente solo se observa un espectro.

Con el DMPO, antes de irradiar, se observa un poco de señal correspondiente de la captura de radicales $\text{HO}^\bullet$. Con la irradiación se obtiene el aducto del DMPO-OH, no observándose prácticamente el aducto del superóxido (que es menos estable y además evoluciona rápidamente al aducto del $\text{HO}^\bullet$). Para asegurar que todo el aducto del DMPO-OH proviene de la captura del radical $\text{HO}^\bullet$ y no por reacción nucleófila y oxidación sobre el DMPO, se repite el experimento añadiendo MeOH (proporción 1:1 respecto al agua). En todos los casos, prácticamente toda la señal observada antes de irradiar se reduce (quedando una pequeña fracción residual de DMPO-OH de origen por ataque nucleófilo de la disolución original de DMPO), apareciendo una pequeña fracción de aducto DMPO- CH_2OH . Al irradiar, la señal de este aducto crece rápidamente, observándose en todos los casos una parte de señal de aducto DMPO-OOH.

En resumen, de estos resultados preliminares, se puede concluir que en todos los casos se generan radicales $\text{HO}^\bullet$ y $\text{O}_2^{\bullet-}$, siendo en algunos casos claramente más activos que el propio TiO_2 (figura 6), no resultando concluyente que se genere $^1\text{O}_2$.

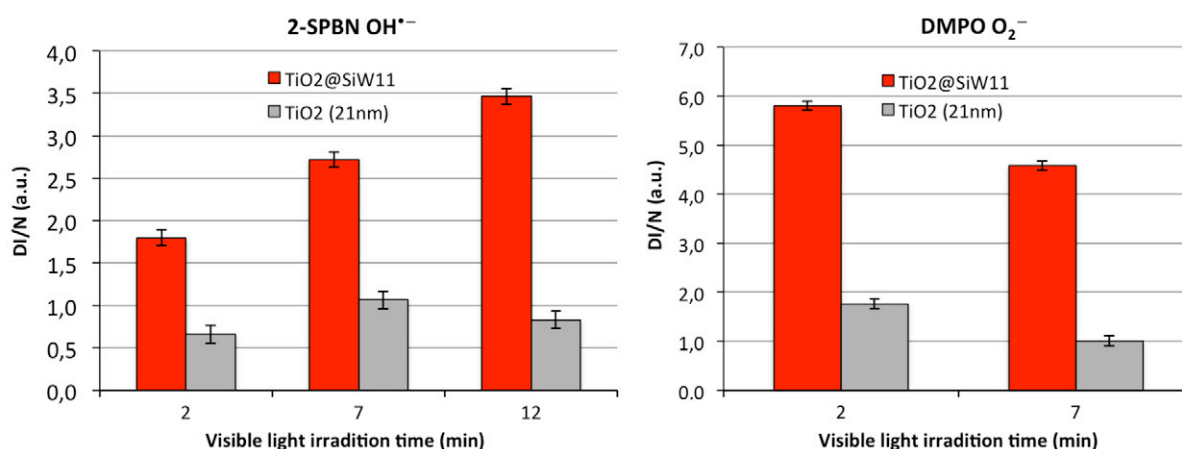


Figura 6. Detección de radicales de oxígeno por EPR a través de un spin-trap: 2-SPBN para $\text{HO}^\bullet$ y DMPO para $\text{HO}^\bullet$ y $\text{O}_2^{\bullet-}$. En cada gráfica se muestran dos tipos de nanopartícula: TiO_2 de 21 nm y las mismas partículas recubiertas con el POM (SiW_{11}), $\text{TiO}_2@\text{SiW}_{11}$. Demuestran la cantidad de señal detectada por cada muestra tras irradiación durante 2, 7 ó 12 min. En todos los casos el $\text{TiO}_2@\text{POM}$ es claramente más activo que el propio TiO_2 .

Materiales superhidrofóbicos: líquidos iónicos de polioxometelatos

Los líquidos iónicos son sustancias compuestas por iones que se funden a una temperatura relativamente baja, hasta aproximadamente 100 °C (Plechkova y Sneddon, 2008: 123-150). Estos materiales han tenido impacto en varias áreas de la química de materiales tales como la síntesis, la catálisis, la química verde, la electroquímica y los sensores, entre otros. El interés en los mismos proviene de sus propiedades notables, como su alta estabilidad, conductividad intrínseca y propiedades electroquímicas únicas. Típicamente, los líquidos iónicos se forman cuando los cationes voluminosos, tales como un alquilamonio, alquifosfonio imidazolio o alquilpiridinio, se combinan con aniones (en este caso con los POM) a través de interacciones electroestáticas (figura 7). Líquidos iónicos de los POM han sido descritos en la literatura (Santos *et al.*, 2016: 945-953; Gong *et al.*, 2016: 421-427), pero debido a la presencia de sales de amonio o fosfonio cuaternario, queríamos explorar estos materiales para aplicaciones antibacterianas.

La síntesis de los líquidos iónicos se prepara de la siguiente manera: se disuelve el $[\text{POM}]^{\text{X-}}$ deseado en agua destilada, bajo agitación magnética vigorosa en vaso de precipitados (solución A). Aparte, se prepara una disolución del catión correspondiente (con X equivalente molar respecto a la carga negativa del POM) en cloroformo (solución B); ambas a temperatura ambiente. Una vez completamente disuelto el POM, se añade la solución A sobre la solución B, y se mantiene durante 30 min bajo agitación magnética vigorosa a temperatura ambiente. Pasados los 30 min, se separa la fase orgánica de la acuosa empleando un embudo de decantación. Se lava dos veces la fase acuosa con cloroformo y la fase orgánica se lava dos veces con agua destilada. Se juntan todas las porciones de fase orgánica y se concentran en el rotavapor. El resultado es un fluido viscoso (a veces amarillento, según el catión empleado), que a las 24 h generalmente se queda con aspecto cremoso. En la figura 8 se presentan los espectros de infrarrojo de un POM-IL representativo, la molécula de $(\text{MTOA})_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$ y de los productos de partida de síntesis del mismo.

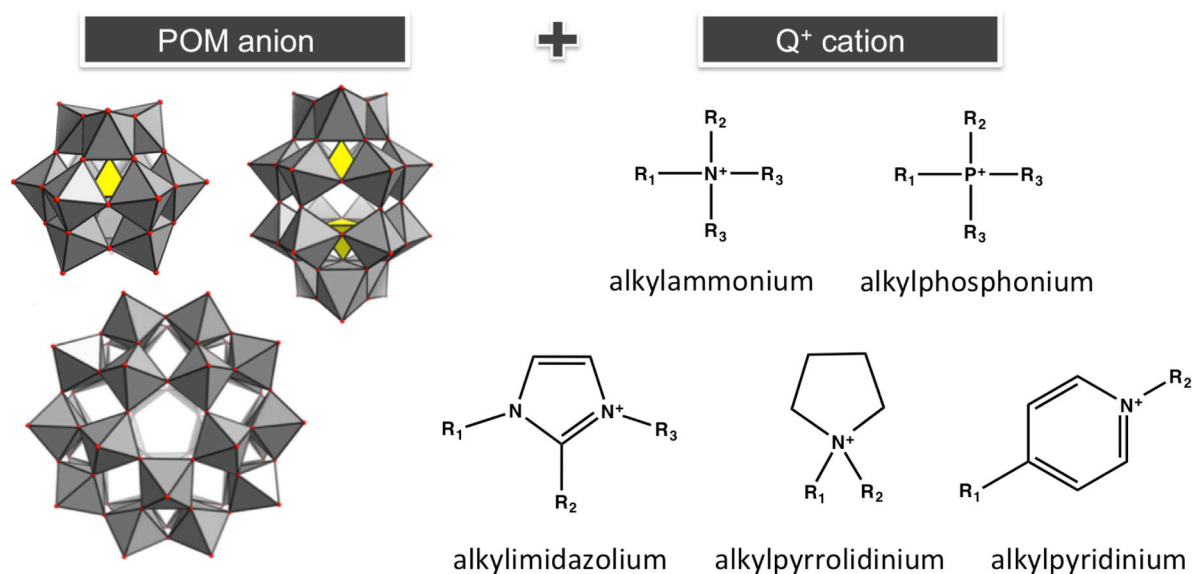


Figura 7. Composición de los líquidos iónicos de los polioxometelatos (POM-ILs) cuando un anión de POM interacciona con un alquilamonio, alquifosfonio imidazolio o alquilpiridinio.

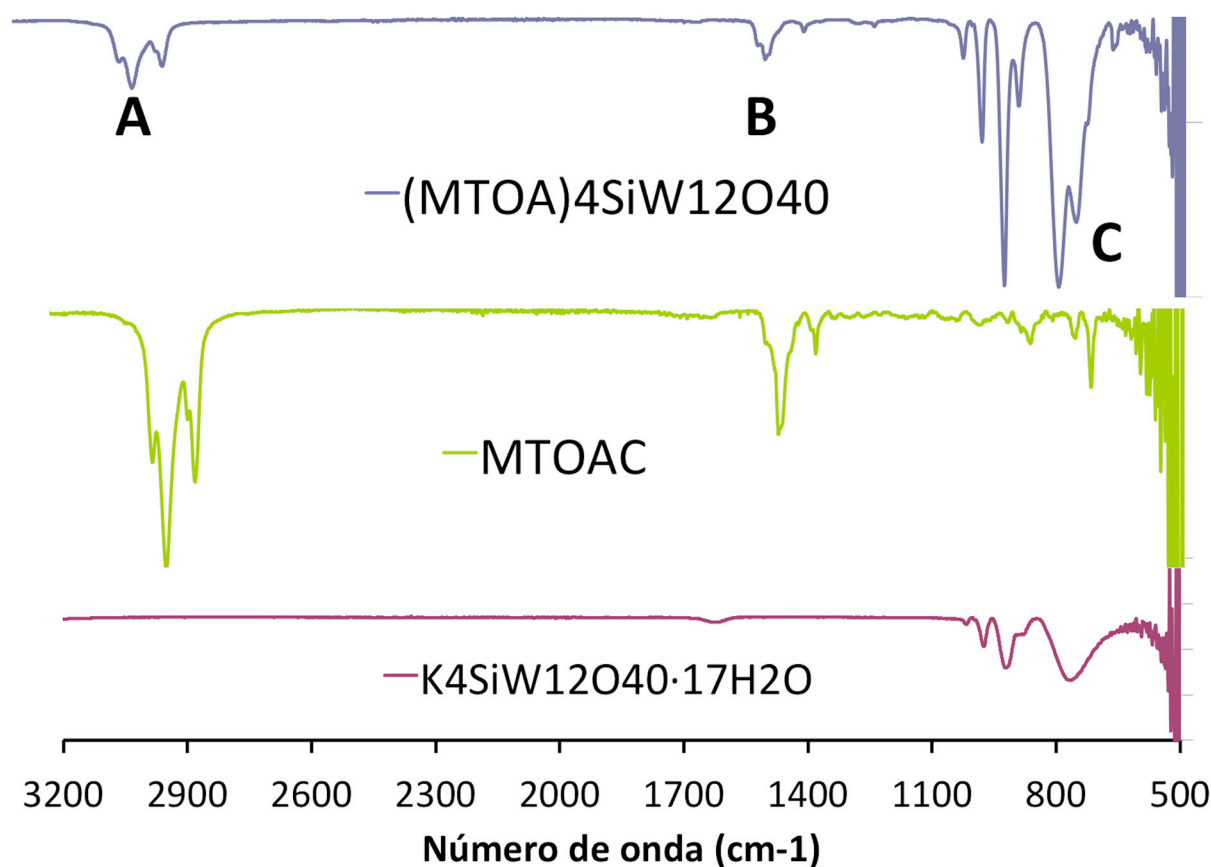


Figura 8. FT-IR (cm^{-1}) de $(\text{MTOA})_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$ junto con sus componentes MTOACI y $\text{K}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40}$. Donde las zonas A = $-\text{CH}_2-\text{CH}_3$; B = $-\text{CH}_2-$ y C = $\text{W}=\text{O}$, $\text{Si}-\text{O}$ y $\text{W}-\text{O}-\text{W}$ (Rocchicciolo-Deltcheff *et al.*, 1983: 207-216).

Ensayos antimicrobianos de los líquidos iónicos de polioxometelatos

El programa de detección de antimicrobianos seguirá una matriz lógica y completa donde la viabilidad celular de varias cepas de bacteria y hongos se analizará mediante mediciones de la densidad óptica y un ensayo espectrofotométrico de viabilidad, utilizando resazurina. A continuación se presenta un ejemplo.

Los POM-IL muestran una alta actividad antimicrobiana y en el caso presentado en la figura 9 se observó la inhibición completa del crecimiento de *E. coli* a concentraciones de 0,75 mg/ml y superior del POM-IL. Se verificó este resultado mediante ensayos colorimétricos de resazurina para cuantificar la viabilidad celular y mostrando que la concentración mínima de inhibición está en torno a 0,5 mg/mL.

Estamos actualmente en plena exploración de una matriz de compuestos similares, cambiando tanto el anión (el POM) y el catión (la sal de amonio cuaternario de cadena larga) para llegar a tener materiales viscosos y transparentes (o con color controlado) con alta actividad antibacteriana. Nuestros resultados hasta ahora nos han demostrado que se puede llegar a tener materiales de aspecto distinto (desde un polvo blanco, hasta una cera opaca y luego un líquido viscoso incoloro) y con propiedades antibacterianas diferentes. Esto nos da mucho juego para formar láminas protectoras encima de materiales antibacterianos débiles y de crear ceras para limpiar superficies ya contaminadas. Aun así, estamos en proceso de llevar a cabo

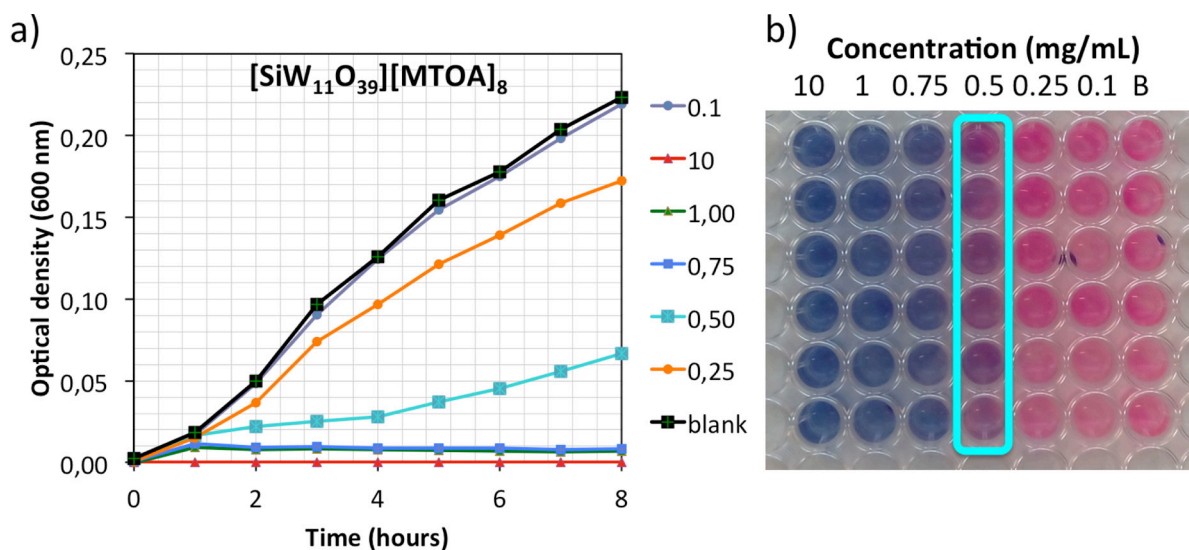


Figura 9. a) El crecimiento de *E. coli* (10⁹ UFC/ml) en medio LB durante 8 horas es dependiente de la concentración del POM-IL (MTOA)₈SiW₁₁O₃₉, observándose inhibición completa del crecimiento bacteriano a concentraciones de 0,75 mg/ml y superior; b) la resazurina (azul) se convierte en resorufina (rosa) con la presencia de células vivas. Este ensayo muestra que hay una fuerte inhibición a 0,5 mg/mL pero un efecto antibacteriano muy evidente a partir de 0,75 mg/mL.

una evaluación del efecto biocida de los materiales producidos, para tener una biblioteca de materiales caracterizados y preparados para probar en varias superficies.

Conclusiones

Como conclusión queremos destacar, como bien saben los conservadores, que los microbios pueden llegar a causar un gran problema a ciertos objetos del patrimonio cultural y a veces no se encuentran con facilidad métodos satisfactorios para su descontaminación y protección. La amplia gama de nanomateriales disponibles hoy en día podrían llegar a aportar nuevas soluciones a los problemas de biodeterioro en objetos del patrimonio cultural. Nuestro grupo está actualmente enfocado en la generación de distintos materiales con el fin de encontrar bibliotecas de nanomateriales activos con capacidad de limpiar superficies de la contaminación biológica para poder mejorar la conservación de estos objetos y/o parar el crecimiento de los biofilm, actuando para preservar el estado del objeto de valor.

Perspectivas futuras

Nuestro reto se centra en evaluar la eficacia de estos materiales en situaciones y muestras más representativas de la realidad. Estudiaremos superficies de papel, cuero y piedra que se contaminarán con microorganismos para simular la contaminación superficial del patrimonio cultural y, posteriormente, estas superficies serán tratadas con los materiales antimicrobianos. Las superficies contaminadas y tratadas serán evaluadas de dos maneras: en primer lugar, por los ensayos de proliferación celular, y en segundo lugar, por microscopías óptica y electrónica para estudiar la proliferación de las colonias en presencia de los antimicrobianos NPs@POM (figura 10). Además, estamos trabajando en colaboración con varios centros para evaluar los materiales más eficaces en muestras reales de papel, piedra y cuero.

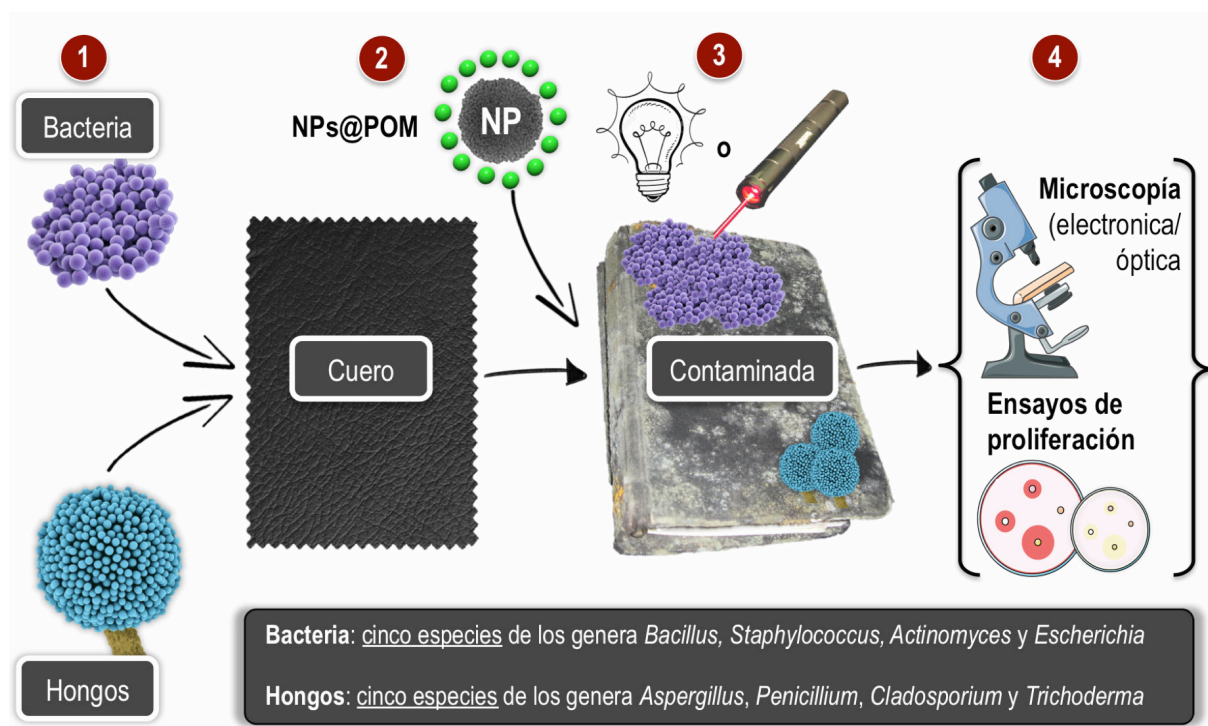


Figura 10. 1) Superficies de papel, cuero y de piedra se contaminan con bacterias y hongos; 2) se utilizarán (en este caso) las NPs@POM para tratar las superficies y matar a los microorganismos; 3) las NPs@POM también se irradian con luz UV-vis o láser para controlar y/o mejorar cualquier efecto fotoactivo. En todos los casos, 4) la eficacia biocida de los materiales se evaluará usando ensayos de proliferación y por microscopía óptica y electrónica.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo del doctor Lluís Fajarí, responsable técnico del Servicio de Resonancia Paramagnética Electrónica del Instituto de Química Avanzada de Cataluña (IQAC-CSIC), por el apoyo técnico con las medidas del EPR. También damos gracias a Álvaro Artiga por las imágenes de TEM y por revisar este texto. El apoyo financiero de la Fundación General CSIC (Programa ComFuturo) es agradecido.

Bibliografía

- ALLSOPP, D.; SEAL, K., y GAYLARDE, C. (2004): «Introduction to biodeterioration». *Cambridge University Press*, p. 237.
- BAGLIONI, M.; GIORGI, R.; BERTI, G., y BAGLIONI, P. (2012): «Smart cleaning of cultural heritage: A new challenge for soft nanoscience». *Nanoscale*, 4: 42-53.
- CORMA, A., y GARCÍA, H. (2008): «Supported gold nanoparticles as catalysts for organic reactions». *Chem. Soc. Rev.*, 37: 2096-2126.
- CRONIN, L., y MÜLLER, A. (2012): «From serendipity to design of polyoxometalates at the nanoscale, aesthetic beauty and applications». *Chem. Soc. Rev.*, 41: 7333-7334.
- DAKAL, T. C., y CAMEOTRA, S. S. (2012): «Microbially induced deterioration of architectural heritages: routes and mechanisms involved». *Environ. Sci. Eur.*, 24: 36.

- DE MATTEIS, L.; MITCHELL, S. G., y DE LA FUENTE J. M. (2014): «Supramolecular antimicrobial capsules assembled from polyoxometalates and chitosan». *J. Mater. Chem. B*, 2: 7114-7117.
- FLORIAN, M. L. (1997): *Heritage Eaters: Insects and Fungi in Heritage Collections*. Londres: James and James (Scientific Publishers) Ltd.
- FLANNIGAN, B., y MILLER, J. D. (1994): *Health Implications of Fungi in Indoor Environments*. Ámsterdam: Elsevier, pp. 3-28.
- FUJISHIMA, A.; HASHIMOTO, K., y WATANABE, T. (1999): *TiO₂ Photocatalysis: Fundamentals and Applications*. Tokio: Bkc.
- GONG, Y.; HU, Q.; WANG, C.; ZANG, L., y YU, L. (2016): «Stimuli-Responsive Polyoxometalate/Ionic Liquid Supramolecular Spheres: Fabrication, Characterization, and Biological Applications *Langmuir*, 32: 421-427.
- GUERRERO-MARTÍNEZ, A.; GRZELCZAK, M., y LIZ-MARZÁN, L. M. (2012): «Molecular thinking for nanoplasmonic design». *ACS Nano*, 6: 3655-3662.
- LIN, W. (2015): «Nanoparticles in Medicine». *Chem Rev.*, 115: 10407-11190.
- MA, F. *et al.* (2012): «Comparison and understanding of the different simulated sunlight photocatalytic activity between the saturated and monovacant Keggin unit functionalized titania materials». *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 401: 116-125.
- MARCÌA, G.; GARCÍA-LÓPEZ, E.; PALMISANO, L.; CARRIAZO, D.; MARTÍN, C., y RIVES, V. (2009): «Preparation, characterization and photocatalytic activity of TiO₂ impregnated with the heteropolyacid H₃PW₁₂O₄₀: Photo-assisted degradation of 2-propanol in gas-solid regime». *Applied Catalysis B: Environmental*, 90: 497-506.
- MITCHELL, S. G., y DE LA FUENTE, J. M. (2012): «The synergistic behavior of polyoxometalates and metal nanoparticles: from synthetic approaches to functional nanohybrid materials». *J. Mater. Chem.*, 22: 18091-18100.
- PAULUS, W. (2004): *Directory of Microbiocides for the Protection of Materials*, 2.^a ed. Kluwer Academic Publishers, p. 779.
- PLECHKOVA, N. V., y SNEDDON, K. R. (2008): «Applications of ionic liquids in the chemical industry». *Chem. Soc. Rev.*, 37: 123-150.
- SANTOS, F. M.; MAGINA, S. P.; NOGUEIRA, H. I. S., y CAVALEIRO, A. M. V. (2016): «Synthesis and characterization of metalsubstituted tetraalkylphosphonium polyoxometalate ionic liquids». *New J. Chem.*, 40: 945-953.
- STEFLINGER, K. (2010): «Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage». *Fung. Biol. Revs.*, 24: 47-55.
- STERFLINGER, K., y PIÑAR, G. (2013): «Microbial deterioration of cultural heritage and works of art — tilting at windmills?». *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 97: 9637-9646.
- STREB, C. (2012): «New trends in polyoxometalate photoredox chemistry: From photosensitisation to water oxidation catalysis». *Dalton Trans.*, 41: 1651-1659.
- STRZELCZYK, A. B. (2004): «Observations on aesthetic and structural changes induced in Polish historic objects by microorganisms». *Int. Biodeterior. Biodegradation*, 53: 151-156.
- ROCCHICCOILO-DELTCHEFF, C. *et al.* (1983): «Vibrational investigations of polyoxometalates. 2. Evidence for anion-anion interactions in molybdenum(VI) and tungsten(VI) compounds related to the Keggin structure». *Inorg. Chem.*, 22: 207-216.
- XIA, Y.; XIONG, Y.; LIM, B., y SKRABALAK, S. E. (2009): «Shape-Controlled Synthesis of Metal Nanocrystals: Simple Chemistry Meets Complex Physics?». *Angew. Chem. Int. Ed.*, 48: 60-103.

- WANATABE, T.; TAKIZAWA, T., y HONDA, K. (1997): «Photocatalysis through excitation of adsorbates. 1. Highly efficient N-deethylation of rhodamine B adsorbed to cadmium sulfide». *J. Phys. Chem.*, 81: 1845-1851.
- WANG, P.; CHENG, M., y ZHANG, Z., (2014): «On different photodecomposition behaviors of rhodamine B on laponite and montmorillonite clay under visible light irradiation». *J. Saud. Chem. Soc.*, 18: 308-316.
- YAMASE, T. (2005): «Anti-tumor, -viral, and -bacterial activities of polyoxometalates for realizing an inorganic drug». *J. Mater. Chem.*, 15: 4773-4782.
- YANAGIDA, S.; NAKAJIMA, A.; SASAKI, T.; KAMESHIMA, Y., y OKADA, K. (2008): «Processing and Photocatalytic Properties of Transparent 12 Tungsto(VI) Phosphoric Acid-TiO₂ Hybrid Films». *Chem. Mater.*, 20: 3757-3764.
- ZHANG, C., y ZHU, Y. (2005): «Synthesis of Square Bi₂WO₆ Nanoplates as High-Activity Visible-Light-Driven Photocatalysts». *Chem. Mater.*, 17: 3537-3545.

Aportación de los estudios científicos a la restauración del Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela: análisis de las alteraciones

Pedro Pérez García

DACITEC, S. L.

pedropgeol@gmail.com

M.^a Antonia García

IPCE

antonia.garcia.r@mecd.es

Livio Ferrazza

Beca Fundación Andrew W. Mellon

livio.ferrazza@gmail.com

Resumen: Los procesos de alteración detectados, que han provocado en muchos casos graves daños en la policromía, se deben a cinco factores interrelacionados entre sí. Las condiciones ambientales serían el primer factor condicionante, en especial, las variaciones de parámetros como humedad y temperatura a diversas escalas temporales y espaciales. El segundo aspecto es la diferente capacidad de respuesta frente a los procesos de alteración de los materiales que constituyen el Pórtico (soporte pétreo, morteros de relleno, pigmentos, etc.). Un tercer tipo de deterioro es el derivado de la colonización biológica, tanto del soporte como de la policromía. El cuarto factor considerado serían las intervenciones realizadas durante la larga historia del Pórtico y que han provocado, en algunos casos, nuevos procesos de deterioro o acelerado los ya existentes. Finalmente, se ha detectado la presencia de depósitos de compuestos con cloro y plomo; la aparición de estos materiales ha supuesto una gravísima degradación de las capas en las que el albayalde es el constituyente principal.

Palabras clave: Alteración, condiciones ambientales, policromía, compuestos con cloro y plomo, biodeterioro.

Abstract: The alteration processes detected, which have in many cases caused serious damage to polychromy, are due to five interrelated factors. The first of these are the environmental conditions and especially the variations of the humidity and temperature conditions at various time scales. The second aspect is the capacity to respond to the processes of alteration of the different materials that constitute «Pórtico de la Gloria» (stone support, mortar filling, pigments, etc.). A third type of deterioration is derived from biological colonization, both the support and the polychromy. The fourth aspect considered would be the interventions carried out during the long history of «Pórtico de la Gloria» and that in some cases have caused new processes of deterioration or accelerated those already existing. Finally, the presence of deposits of compounds with chlorine and lead has been detected. The appearance of these materials implies a very serious degradation of the layers in which the lead white is the main constituent.

Keywords: Alteration, environmental conditions, polychromy, compounds with chlorine and lead, biodeterioration.

Introducción

El Pórtico de la Gloria es, sin duda, uno de los elementos artísticos más destacados del conjunto catedralicio de Santiago de Compostela. Esta construcción de tres arcos, que se sitúa en la entrada occidental de la catedral, es uno de los más grandes monumentos medievales mundiales, tanto por su calidad artística excepcional como por su evidente importancia dentro de la historia cultural europea. En este sentido, además de ser considerada una obra artística singular en piedra policromada, hay que considerar su valor simbólico y espiritual como punto final de diversos caminos jacobeos y su importancia como lugar turístico de renombre internacional.

Tras la firma conjunta en el año 2006 de un convenio entre la Fundación Barrié, el arzobispado de Santiago de Compostela y el Cabildo Catedral, comenzó su andadura el Plan Catedral. Dentro de este marco, se desarrolló un ambicioso proyecto centrado en el estudio y conservación del Pórtico de la Gloria, al que se incorporaron en el año 2010 el Instituto de Patrimonio Cultural de España y la Dirección Xeral do Patrimonio para compartir la dirección técnica de este proyecto.

Dentro de este proyecto, concebido con un claro carácter interdisciplinar, se han realizado estudios de muy diversa índole (históricos, constructivos, arquitectónicos, arqueológicos, científicos) por parte de investigadores de diversas empresas e instituciones públicas y privadas. La enorme cantidad de datos obtenidos de estos estudios ha servido para conocer de una manera muy precisa cuál es el estado de conservación del Pórtico de la Gloria, evaluar cuáles son los riesgos existentes y establecer cuáles deberían ser las actuaciones necesarias para estabilizar los procesos de deterioro existentes.

Los estudios científicos llevados a cabo con motivo de la restauración del Pórtico de la Gloria no se realizan con el sentido tradicional de «estudios previos a», sino bajo la convicción de que el proceso de restauración comenzó hace ya años con los primeros análisis, continúa actualmente con la intervención sobre el Pórtico y deberá proseguir con un programa de mantenimiento preventivo, posterior a la intervención.

Estudios científicos previos

Aunque los estudios sobre el Pórtico de la Gloria son muy abundantes, los acometidos desde un punto de vista científico son más escasos, habiéndose realizado sobre todo en los últimos 20 años. El primero de ellos corresponde a un proyecto titulado «Estudio, diagnose e medidas urxentes previas a restauración integral do Portico da Gloria. Catedral de Santiago de Compostela» y acometido entre los años 1992 y 1993 por una UTE entre la Fundación Empresa-Universidad Gallega (UGA) y la empresa CPA S. L. Dentro de este proyecto se realizó una intervención parcial en tres zonas (tercer nivel de arco central y arcos laterales y figuras de arranque de bóvedas derecha e izquierda) y se redactó un estudio histórico-artístico por parte de Serafín Moralejo. Además, se acometió un estudio de las características climáticas y de los materiales del conjunto escultórico y, por último, un análisis de las policromías por parte de Carmen del Valle y José María Cabrera, en el que se incluía una extensa documentación fotográfica, un análisis de los daños existentes, complementado con cartografías de las lesiones y un estudio de la secuencia estratigráfica de las capas policromas.

Posteriormente, en el año 2000, la empresa TOMOS realiza un «Informe sobre el estado de alteración de los basamentos y columnas del Pórtico de la Gloria. Catedral de Santiago de

Compostela». En este informe se realiza un estudio de las humedades y sales contenidas en las basas y columnas del Pórtico, se determinan los factores de alteración –humedades de distinta tipología, sales solubles, rebaje del suelo al cambiar el solado de la nave central en los años cincuenta y factores antrópicos como, por ejemplo, el rito táctil–, se analizan los granitos y mármoles del soporte y se establece un posible origen de los mismos, se dictamina cuál es el estado de conservación actual, se presenta una cartografía de alteraciones y, finalmente, se establecen unas recomendaciones de actuación.

En el año 2004, un equipo de la Escuela de Ingenieros de Minas de Madrid realiza el estudio titulado «Pórtico de la Gloria. Causas de deterioro». Dentro de este estudio se pueden destacar los siguientes aspectos:

- a) Análisis microclimático (humedad y temperatura), estudio y cartografía de sales y humedades y determinación de la naturaleza de las sales.
- b) Caracterización de los tipos de piedra existentes.
- c) Caracterización de la policromía.
- d) Descripción de los daños.
- e) Realización de estudios con georradar y termografía de infrarrojos y de pruebas de limpieza.
- f) Propuesta de actuación con especial énfasis en el control de humedades.

Los estudios realizados por la COOBEC (Cooperativa Beni Culturali) entre los años 2010 y 2012, enmarcados dentro del Programa Catedral, constituyeron sin duda un avance importantísimo en el conocimiento del Pórtico de la Gloria. Dentro de este macroproyecto interdisciplinar cabe destacar la realización de los siguientes estudios:

- Estudio estructural realizado por la Universidad de Perugia y coordinado por el profesor Antonio Borri, cuyos objetivos fundamentales fueron conocer el origen de las grietas y fisuras y determinar el funcionamiento estructural del Pórtico.
- Estudio constructivo realizado por Rodrigo de la Torre, que ahondó en el conocimiento de materiales, técnicas de tallado y procesos constructivos.
- El estudio de biodeterioro fue abordado de manera simultánea por personal del área de biodeterioro del IPCE y por biólogos contratados por la COOBEC. Se realizaron estudios mediante cultivos y se determinaron cuáles eran los microorganismos dominantes: cianobacterias y algas junto a menores porcentajes de actomicetos (bacterias), hongos, bacterias y posibles líquenes.
- El estudio petrológico realizado por Arcadia Ricerche, S. L. R., condujo al establecimiento de cuatro grupos de granitos, que fueron comparados con muestras de canchales locales. Dentro de este estudio también se abordaron estudios de alteración del material: grado de absorción por inmersión, grado de absorción por higroscopicidad, porosimetría y medición de sales solubles por cromatografía iónica.
- Estudio de morteros superficiales con determinación del tipo de ligante y árido, así como del contenido en sales. El análisis realizado permitió la determinación de cinco tipos de morteros distintos.
- Estudio de policromía realizado por Artelab en el que, además del conocimiento de los pigmentos empleados, se establecen las principales fases de policromía existentes.
- Estudio de policromía MOLAB, centrado en la identificación de pigmentos y productos de alteración mediante FRX, FTIR, colorimetría y fluorescencia de UV.
- Por último, hay que destacar la realización de distintas pruebas y actuaciones en el Pórtico, entre las que podemos destacar la eliminación de depósitos biológicos, sales solubles y concreciones, limpiezas de distinta tipología y sobre distintos materiales, eliminación de juntas, cera, consolidación piedra.

Las alteraciones en el Pórtico de la Gloria

El estado de conservación del Pórtico se puede considerar como muy preocupante, no tanto en relación con el material soporte, sino, fundamentalmente, en lo relativo a las capas pictóricas (figura 1). De una manera esquemática y algo simplista, se pueden clasificar las alteraciones identificadas en cinco categorías: deterioro ligado a las variaciones de las condiciones ambientales, deterioro relacionado con los materiales empleados (materiales orgánicos, pigmentos, material pétreo, policromía, etc.), deterioro ligado a la biocolonización, deterioro ligado a intervenciones realizadas en el pasado y, por último, una alteración especial, relacionada con la aparición de compuestos enriquecidos en cloro y plomo. Esta clasificación, un tanto artificial, no deja de ser un mero intento de correlacionar las causas con los daños existentes, estando en la mayoría de los casos implicadas varias de estas causas en las alteraciones identificadas (figura 2).

Con relación a las alteraciones vinculadas a las variaciones en distintos parámetros ambientales, como dato previo hay que señalar que la identificación de vías de entrada de agua desde las torres adyacentes –sobre todo la sur– obligó a intervenir en ellas, antes de acometer la restauración del Pórtico. Aun así, la propia ubicación del Pórtico, junto a la fachada del Obradoiro, el constante trasiego de gente en la catedral y el clima de Santiago, provocan importantes variaciones en las condiciones de humedad y temperatura reinantes en el entorno de la obra del maestro Mateo.



Figura 1. Imagen general del tímpano en la que se puede observar el estado general de la policromía.



Figura 2. Imagen en la que se aprecia la desigual conservación de la policromía y sus alteraciones.

En cuanto a la alteración de los materiales, hay que señalar que, de manera general, el material soporte (granito y en pequeñísima proporción mármol) no muestra una degradación muy severa, por lo que en este artículo nos vamos a centrar en caracterizar la alteración de la policromía, cuyo estado de conservación es crítico en muchas áreas.

La alteración ligada al desarrollo de microorganismos, como se ha señalado previamente, ya ha sido abordada en etapas anteriores. Además, actualmente, durante la fase de intervención propiamente dicha, se está realizando un seguimiento del biodeterioro de manera conjunta por el laboratorio de biología del IPCE y el CSIC.

Las intervenciones realizadas en esta obra se han sucedido a lo largo de sus más de ocho siglos de existencia y han supuesto desde simples labores de mantenimiento a obras de mayor calado que han implicado, en algún caso, repolicromados generales de toda la obra escultórica. Es evidente que las labores de limpieza y conservación en una obra de esta antigüedad no se habrán ejecutado siempre con la delicadeza y medios requeridos, y que la utilización de productos poco adecuados habrá provocado daños en la policromía. Queda lejos del alcance de este artículo analizar las numerosas intervenciones realizadas en el Pórtico, pero es evidente la necesidad de un estudio documental exhaustivo centrado en este aspecto, que, eventualmente, pudiera relacionar algunas de las intervenciones con las patologías detectadas.

Por último, la alteración ligada a la aparición de diversos compuestos enriquecidos en cloro y plomo ha sido citada en algunos de los estudios más recientes realizados en la catedral de Santiago, si bien el origen, alcance y relación con el deterioro de las capas pictóricas no ha sido abordado de una manera científica.

Alteración ligada a las condiciones ambientales

Durante la larga historia del Pórtico, este ha estado sometido a distintas condiciones como consecuencia del estado y características de puertas y ventanas cercanas al Pórtico, estado de las edificaciones anexas, solados, ventilación general del edificio, entrada, salida y circulación de gente, ritos de los peregrinos, calefacción en el edificio, etc. Todas estas variables han condicionado que durante algunas épocas hayan existido ciclos de variaciones de humedad y temperatura muy extremos que han influido en el deterioro de la policromía.

Presentamos en este apartado los estudios relacionados, por una parte, con el análisis de las condiciones ambientales, y por otra, con el contenido en sales y la humedad superficial. Estos trabajos han sido realizados en el primer caso por la empresa TSA y en el segundo por la empresa GEOARTEC.

En relación con el análisis de los parámetros ambientales, la empresa TSA ha sido la encargada de diseñar la colocación y tipología de sondas tanto en el Pórtico como en distintas zonas de la catedral; también ha realizado el seguimiento de las medidas ambientales y su interpretación desde el año 2012 hasta la actualidad. En el Pórtico se han instalado seis sondas en distintas ubicaciones que miden varios parámetros: humedad relativa en superficie e interior, temperatura ambiental, temperatura en interior, temperatura de contacto, temperatura de proximidad y concentración de CO₂ (figura 3). En el resto de la catedral hay instaladas una sonda en el exterior (fachada del Obradoiro), dos en las naves a distintas alturas y hay previsión de instalar nuevas sondas en la capilla mayor. En etapas anteriores también se instalaron varias sondas en la zona de tribuna.

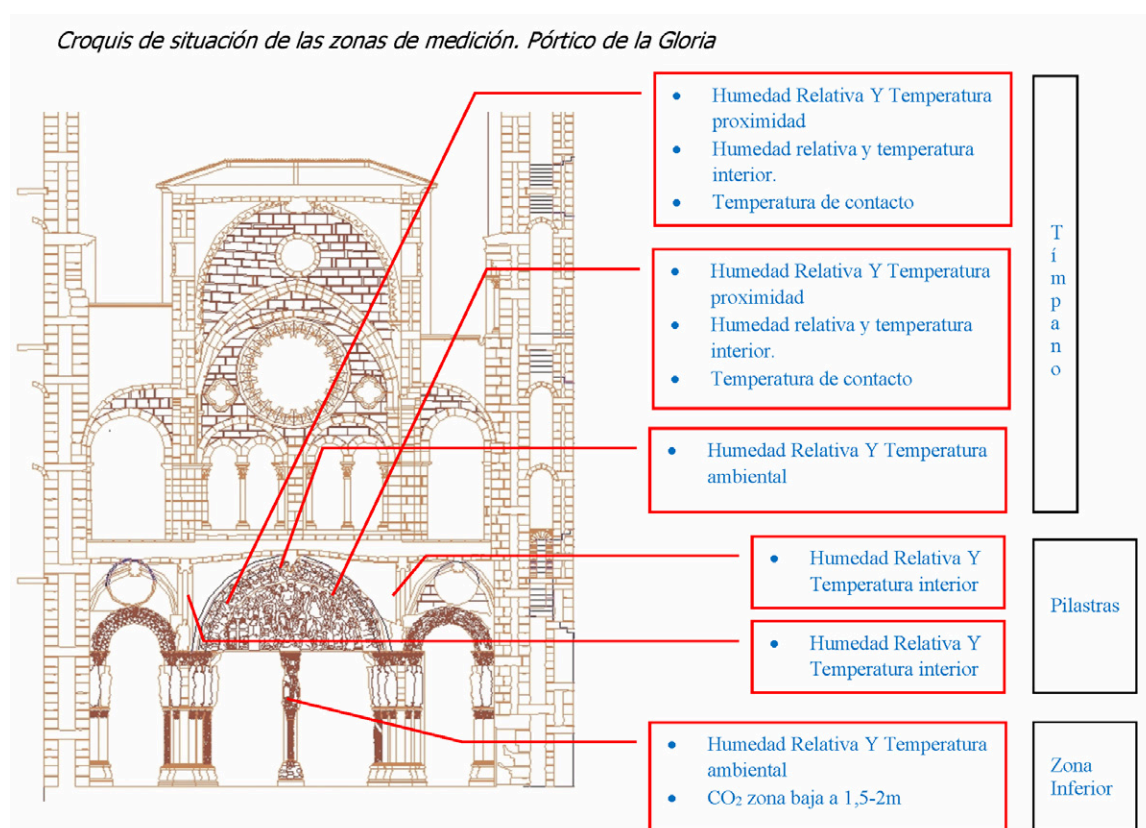


Figura 3. Ubicación de los puntos de medición de los parámetros ambientales en el Pórtico de la Gloria. Elaborado por TSA.

De una manera muy resumida, se puede señalar que los datos recogidos entre finales del 2015 y mediados de 2016 reflejan valores de humedad relativa que oscilaban entre el 55 % y el 90 %, temperaturas que oscilaban entre 14 °C y 23 °C, valores muy constantes de humedad relativa y temperatura en el interior de los paramentos y riesgo máximo de condensación superficial durante los meses de agosto, octubre y diciembre, cuando la diferencia entre el punto de rocío y la temperatura de la superficie es mínimo. Con el objetivo de tener un mayor control sobre las condiciones ambientales, especialmente en la parte superior del Pórtico, se decidió cambiar las ventanas anteriores e instalar otras de madera con filtros de protección frente a la radiación solar y aberturas en la parte inferior y superior de las carpinterías que, según las necesidades, puedan permitir la ventilación del espacio del Pórtico y el secado general de las esculturas o permanecer cerradas en caso de que aumente el riesgo de condensación. Las medidas de los distintos parámetros ambientales, a falta de un control durante un intervalo temporal superior, parecen indicar una respuesta en los paramentos, conforme a lo esperado.

Los estudios de humedad superficial y sales en los paramentos, realizados por la empresa GEOARTEC TECHNICAL SOLUTIONS, han aportado una valiosa información sobre el contenido salino y el grado de humedad tanto en los paramentos del Pórtico como en la tribuna y la peineta. Centrándonos en el Pórtico propiamente dicho, las humedades más significativas, de desarrollo vertical se registran en el pilar sur, pilastra sur y pilastra norte y estarían relacionadas sobre todo con filtraciones de zonas superiores –zonas de contacto con las torres–. Estas humedades, de carácter residual, obedecerían a filtraciones anteriores a la reparación de las cubiertas; además, en función de la coincidencia entre los máximos de humedad y salinidad, pueden ser consideradas como higroscópicas (figura 4).

En cuanto a las sales, la mayor concentración de los cuatro paramentos analizados en el entorno del nártex se produce en el muro este (Pórtico de la Gloria). De una manera más concreta, los valores de conductividad más elevados se registran en la mitad sur, con máximos registrados en diversos puntos de las figuras de los apóstoles. También se identifican contenidos salinos destacables en la pilastra norte, en el encuentro con la pared lateral norte y en el zócalo del pilar norte (figura 5). Por la tipología de sales detectada (bicarbonatos, cloruros y sodio), estas sales se relacionan con aguas meteóricas.

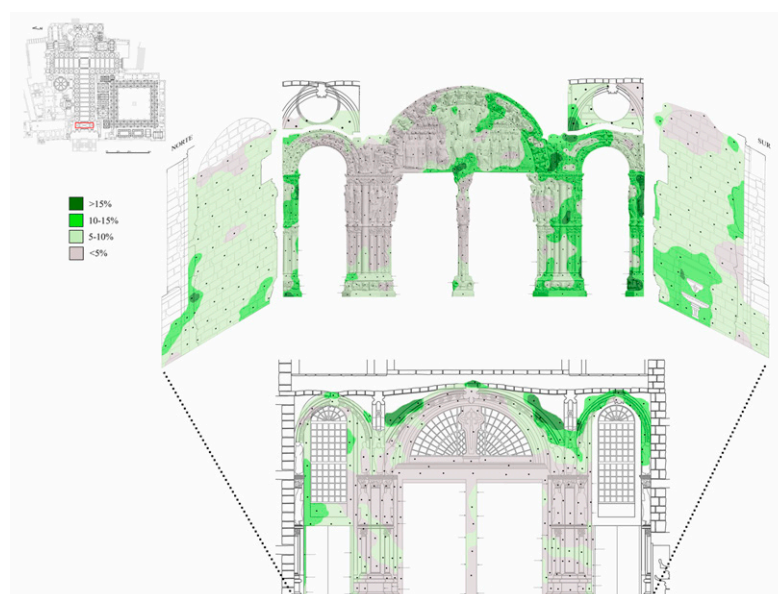


Figura 4. Mapa de humedades en los cuatro paramentos del nártex de la catedral de Santiago de Compostela. Elaborado por GEOARTEC.

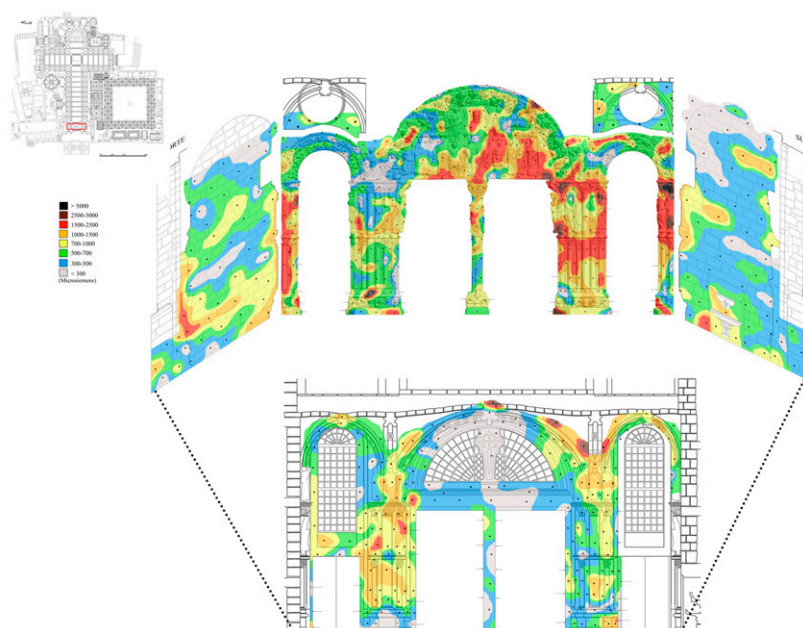


Figura 5. Mapa de sales en los cuatro paramentos del nártex de la catedral de Santiago de Compostela. Elaborado por GEOARTEC.

Alteración ligada al desarrollo de microorganismos

Este tipo de alteración está muy localizada espacialmente, apareciendo asociada a zonas con una humedad constante en el tiempo. Actualmente, en una primera aproximación visual al monumento, se localiza en el arco meridional y en menor medida en la zona de encuentro con el arco central, presentando diferentes características en función del organismo colonizante y de la penetración del mismo en el sustrato.

Es muy probable que en épocas pasadas, en las que el Pórtico estuviese más expuesto a las condiciones ambientales exteriores, especialmente el agua de lluvia o de filtraciones, el biodeterioro haya sido un problema más grave y más generalizado.

Los estudios analíticos realizados permiten identificar sobre todo cianobacterias y algas, con menores desarrollos de bacterias (sobre todo actinomicetos), hongos, y posibles líquenes, si bien los análisis efectuados hasta el momento, a falta de un muestreo más sistemático, revelan la ausencia de una colonización microbiana generalizada y de daños estructurales destacables en el material granítico.

Alteración relacionada con las capas de policromía

Introducción

El grado de alteración que se observa en la policromía del conjunto escultórico del Pórtico de la Gloria está relacionado con una serie de factores, entre los cuales destacan los siguientes:

1. La composición química, tamaño de grano y morfología del pigmento condicionan su alterabilidad.
2. La naturaleza y cantidad de aglutinante de los distintos estratos; en este caso el aglutinante es aceite de lino, por lo que se trata de una policromía al óleo. En aquellas

capas donde existan pigmentos básicos (como son los de plomo) se produce la formación de jabones metálicos, así como la formación de craquelados en capas de policromía donde haya un exceso de aceite secante.

3. Espesor, porosidad y permeabilidad de las capas pictóricas.
4. Otro elemento a tener en consideración es la situación específica de la policromía dentro del Pórtico, ya que se observa una mayor alteración de la misma en aquellas zonas donde hay más humedad y mayor concentración salina.
5. Los posibles tratamientos aplicados en las diferentes intervenciones también afectan en gran medida a la superficie pictórica.
6. Por último, el grado de adhesión de las capas pictóricas al soporte pétreo influye en el estado de conservación de la policromía.

Las alteraciones observadas tanto en el estudio *in situ* como en el análisis de las correspondientes micromuestras pueden clasificarse de la siguiente forma: capas de policromía alteradas por un tratamiento aplicado; alteración o transformación química de los pigmentos; capas pictóricas que presentan fisuración y sucesivo desprendimiento; estratos de policromía que presentan desprendimiento y disgregación, y capas que presentan pulverización.

El estudio de alteraciones de la policromía que se expone en el artículo se centra en el análisis de micromuestras extraídas en diferentes zonas del conjunto escultórico del Pórtico, donde se aprecia un significativo grado de deterioro de las capas pictóricas.

Alteración debida a tratamientos aplicados

En determinadas zonas del Pórtico se observa un color verdoso en la superficie, relacionado con la presencia de restos biológicos, sobre la superficie de la policromía. Para ilustrar esta alteración se presenta el estudio de una muestra tomada en el ala del ángel localizado en el arco sur, que denota la presencia en la capa superficial rojiza de restos de microorganismos.

El estudio realizado en la muestra revela que las capas de preparación y pictórica presentan un aspecto poroso y disgregado y aparecen mezcladas. El análisis elemental y la morfología de la capa superficial indican la existencia de oxalato de calcio. Además, en el análisis cromatográfico de este estrato se detecta una proteína. El origen del oxalato de calcio podría relacionarse con la degradación de tratamientos proteicos aplicados intencionadamente. Asimismo, las imágenes de microscopía electrónica de la superficie de la muestra confirman la existencia de oxalato cálcico y la presencia de partículas de origen biológico indicativas de una abundante biocolonización (figura 6).

Alteración de los pigmentos

El primer caso corresponde a la existencia de capas de policromía originalmente azules, realizadas con azurita pero que presentan un tono ligeramente verdoso. Por ejemplo, en la muestra tomada en la parte superior del tímpano en la túnica de uno de los ángeles, se observa en la microfotografía estratigráfica (figura 7) que en la capa azul verdosa se detectan granos azules de azurita y granos verdes de un compuesto de cloro y cobre que podría estar relacionado con una alteración de la azurita, con la consiguiente formación de un posible cloruro de cobre verde. Respecto a la posibilidad de alteración de la azurita en algunas vestiduras con capas pictóricas azules, se identifican en el mismo estrato granos azules (azurita) y verdes de cobre con una morfología similar; este hecho podría explicarse por la coexistencia de dos pigmentos de cobre azul y verde (azurita y malaquita, respectivamente) o por una posible transformación química de la azurita a malaquita.

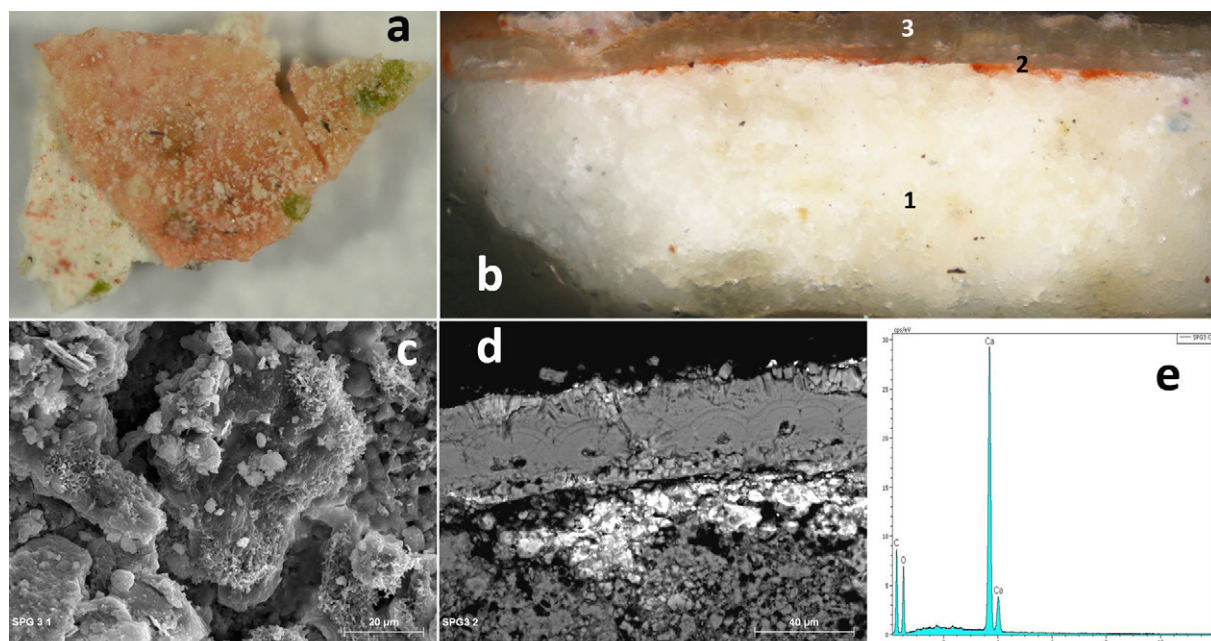


Figura 6. a) Fotografía de microscopía estereoscópica de la muestra; b), fotografía de microscopía óptica de la muestra estratigráfica; c), imagen de microscopía electrónica de electrones secundarios de la capa superficial donde se aprecia la biocolonización existente; d), imagen de microscopía electrónica de electrones retrodispersados de la estratigrafía, y e), espectro EDX de la capa superficial de oxalato cálcico.

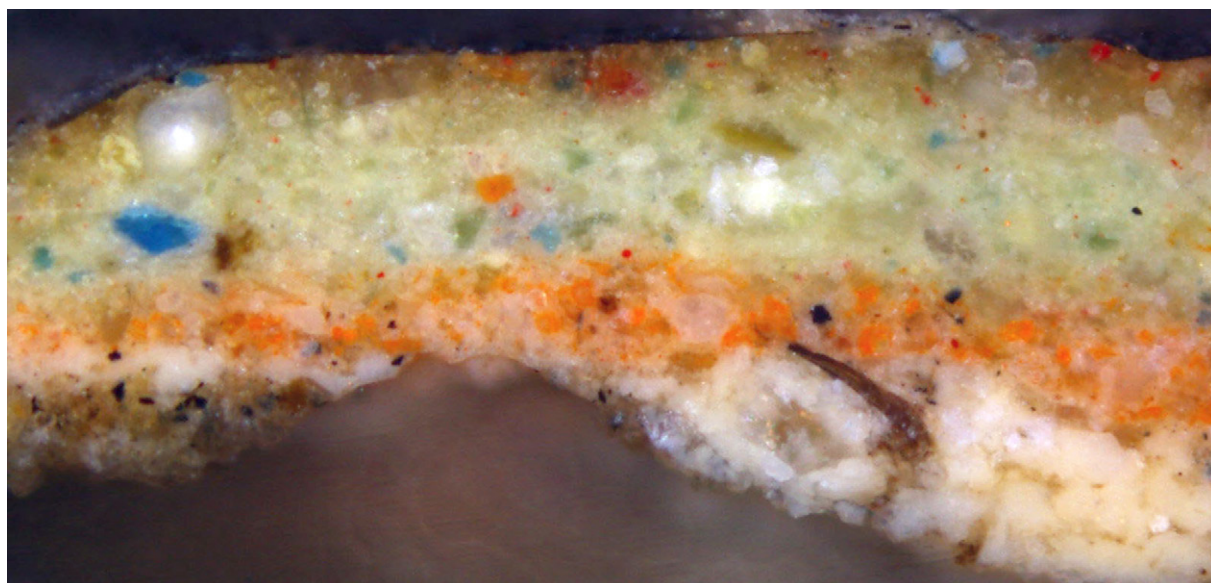


Figura 7. Fotografía de microscopía óptica de la muestra estratigráfica.

Existen capas de policromía verdes, compuestas por verdigrís como pigmento verde aglutinado con aceite de lino, las cuales presentan en su superficie un aspecto pardo oscurecido debido a la oxidación de los componentes de la policromía¹ (figura 8).

¹ El verdigrís reacciona con el aceite secante con la consiguiente formación de un jabón de cobre (formación de un carboxilato), y por tanto, debido a la oxidación de los componentes, la pintura se torna parda.

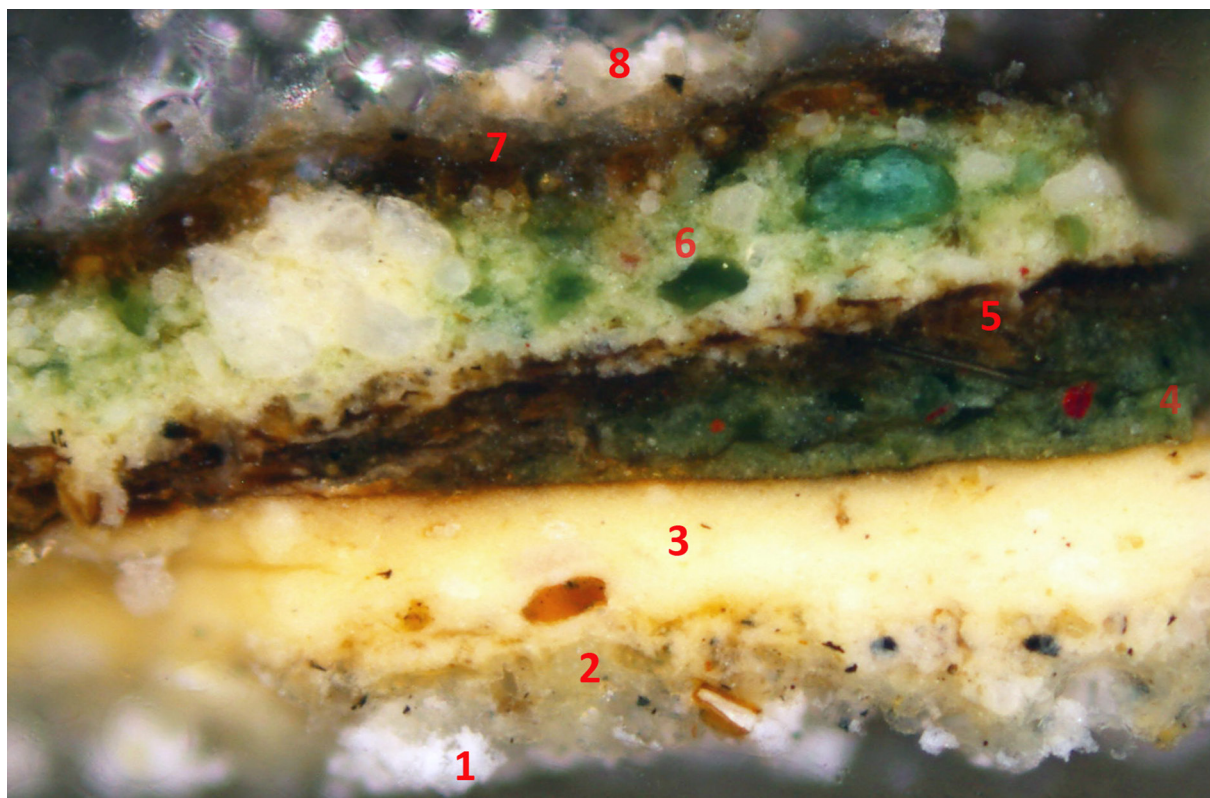


Figura 8. Fotografía de microscopía óptica de la muestra estratigráfica.

Otras alteraciones significativas

Existen dorados caracterizados por su fácil desprendimiento del asiento y disgregación. Es el caso de las láminas metálicas de oro sobre policromía azul de muestras procedentes de los Ancianos, en la parte superior del tímpano. En el estudio estratigráfico de estos se observan las siguientes características que contribuyen a este fenómeno de deterioro: la imprimación o capa de preparación de la policromía aparece alterada a compuestos de cloro y plomo, especialmente la parte más interna, observándose una elevada disgregación; existe una descohesión granular tanto en la capa de policromía azul compuesta por lapislázuli como en el asiento del dorado, así como una falta de adhesión y fisuración entre las capas; por último, la lámina de oro muestra una escasa adhesión con el asiento y se presenta discontinua (figura 9).

También es destacable la existencia de capas pictóricas que presentan fisuración y un sucesivo desprendimiento de las mismas; es el caso del rosado de las encarnaciones que más se aprecian en el conjunto escultórico. En este sentido, se trata de capas de policromía de gran espesor y con una cantidad ligeramente excesiva de aceite secante como aglutinante. Este exceso de aceite posiblemente dé lugar a los craquelados observados en la superficie pictórica, debidos a la oxidación y polimerización que se produce en el aceite durante su proceso de secado. Un ejemplo ilustrativo de este deterioro es la muestra estratigráfica de encarnación extraída de la figura del Pantocrátor. El estudio de la muestra indica las características que se describen a continuación (figura 10). Se aprecian rupturas longitudinales que implican la falta de cohesión y adhesión entre las capas, fenómeno que se observa en la imprimación inferior y en la parte superior de la encarnación más externa. Además de la formación de fisuras en la superficie, existen rupturas transversales que implican una migración de los materiales entre los estratos más internos y la superficie de la muestra. Es im-

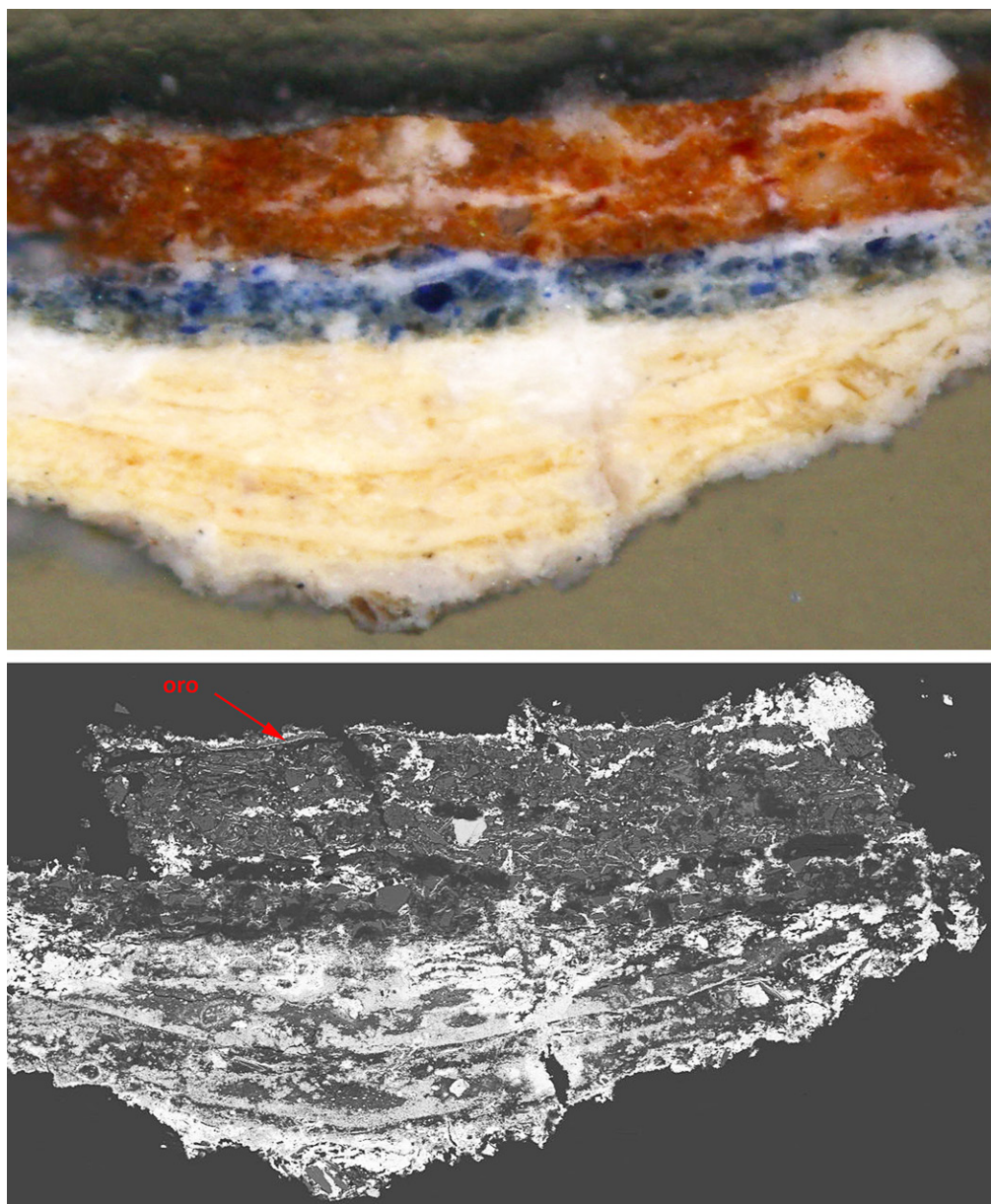


Figura 9. Imágenes equivalentes de microscopía óptica (superior) y microscopía electrónica (BSE) de la muestra estratigráfica (inferior).

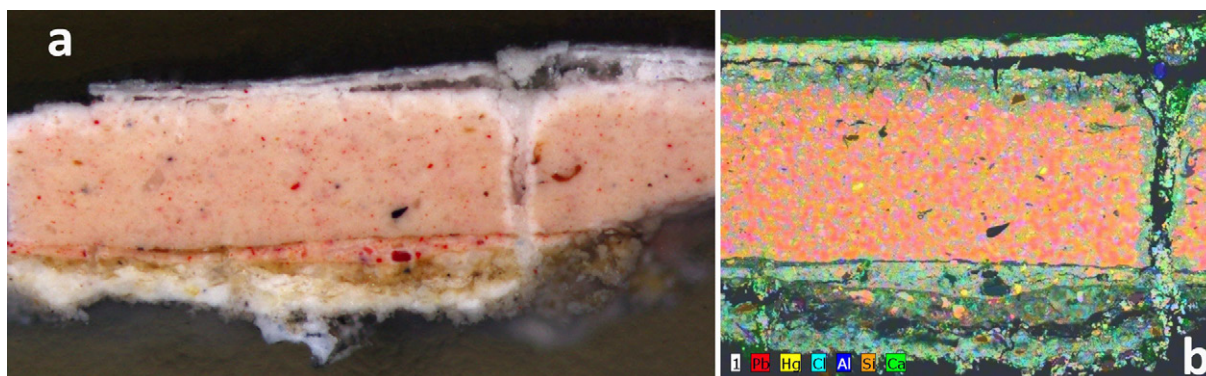


Figura 10. Fotografía de microscopía óptica de la muestra estratigráfica (a), mapa de distribución elemental (obtenido con EDX) sobre imagen SEM donde se indica la distribución de los elementos en cada una de las capas (b).

portante resaltar la abundancia de depósitos de compuestos de cloro y plomo sobre todo en la parte inferior y superior de la muestra, dando lugar a un estrato superficial blanquecino, así como la detección de estos en las rupturas transversales. La presencia de estos compuestos también contribuye en gran medida al grave deterioro que sufre la policromía en muchas zonas del Pórtico. En este sentido, se analiza este tipo de compuestos en aquellas áreas de las esculturas donde quedan restos de policromía, siendo más abundantes en las encarnaciones. En el siguiente apartado se tratará de forma más detallada la naturaleza de estos compuestos y su incidencia en el deterioro de la policromía.

Se ha detectado una acusada disgregación en las capas de policromía azules compuestas por azul de lapislázuli que aparecen aplicadas sobre la imprimación o preparación de albayalde. En estas policromías, tal y como se aprecia en una de las muestras (figura 11), existe una descohesión entre los granos de lapislázuli. De la misma forma que en la mayoría de las muestras de policromía analizadas, hay presencia de compuestos de cloro y plomo en la parte superior e inferior de la muestra, así como migración de estos compuestos entre la imprimación y las capas más externas, observándose una mezcla de las mismas; la forma de distribuirse de estos compuestos hace que actúen como cementantes de los granos de lapislázuli.

Además de las alteraciones anteriores, se aprecian de forma generalizada en otras policromías del Pórtico fenómenos de desprendimiento de fragmentos y pulverización relacionados con la naturaleza oleosa del aglutinante. Hay capas de policromía rojas que contie-

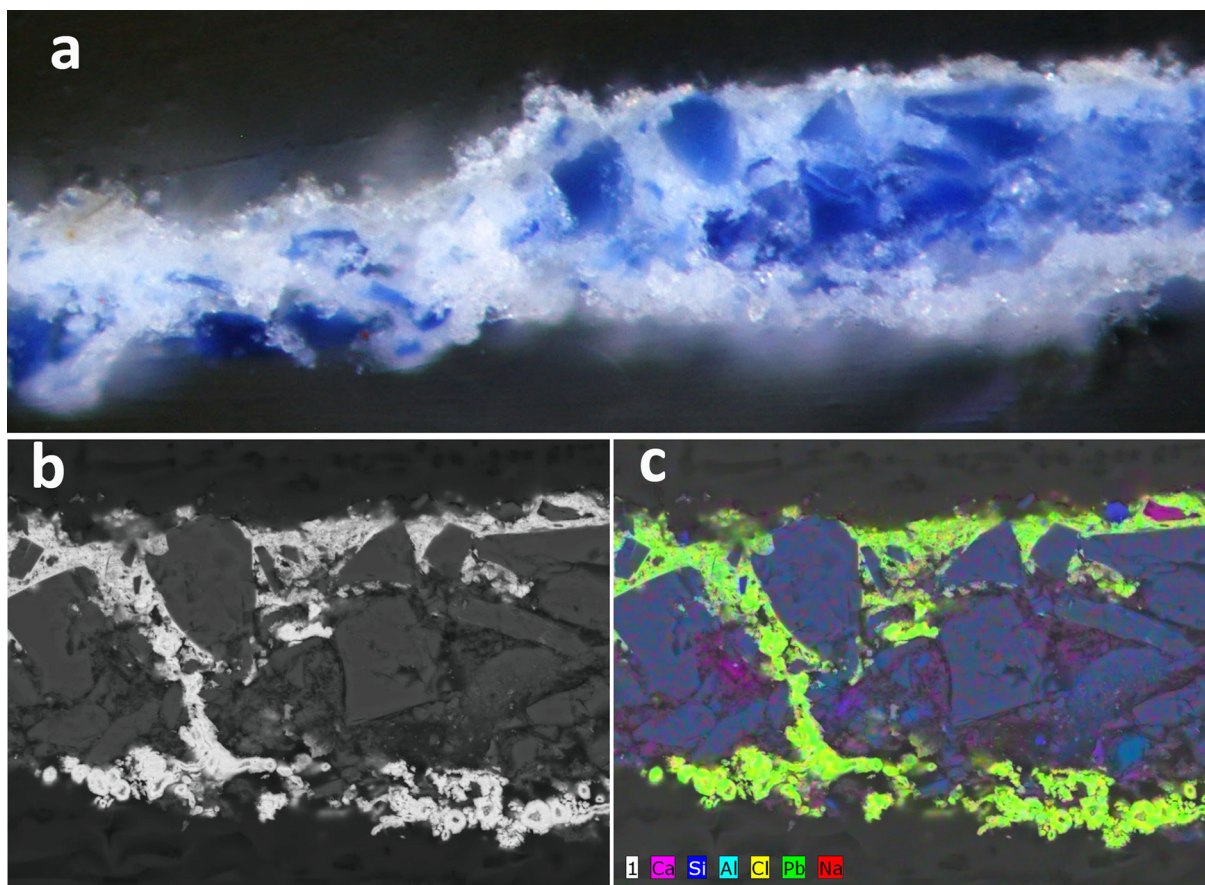


Figura 11. a) fotografía de microscopía óptica de la muestra estratigráfica; b) imagen de microscopía electrónica de electrones retrodispersados de la estratigrafía; c) mapa de distribución elemental (obtenido con EDX) sobre imagen SEM donde se indica la distribución de los elementos en cada una de las capas.

nen bermellón y otras compuestas por tierras, aplicadas sobre imprimaciones con pigmentos de plomo, donde hay una descohesión entre los granos de pigmento o disgregación de la policromía. Esto puede deberse al envejecimiento del aceite de lino, que lo hace más sensible a la acción del agua y de la humedad, disminuyendo la estabilidad de la capa pictórica, o por la acción de algún tratamiento de limpieza que produzca la saponificación del aceite degradándolo, causando el aspecto pulverulento de la policromía. Además, la existencia de capas con pigmentos de plomo da lugar a la formación de jabones de plomo², los cuales constituyen aglomeraciones o inclusiones (que contienen jabón en su interior) que tienden a ir hacia la superficie, dando lugar a superficies rugosas además de contribuir a un debilitamiento de los estratos pictóricos. Es importante destacar que este fenómeno de deterioro, posiblemente relacionado con la formación de jabones metálicos, se extiende en todas aquellas zonas del Pórtico donde se conservan restos de policromía que contengan pigmentos de plomo.

Alteración ligada a la presencia de compuestos enriquecidos en cloro y plomo

Un primer acercamiento a las bellísimas esculturas policromadas del Pórtico de la Gloria permite apreciar la existencia, en la superficie de muchas de ellas, de un velo blanquecino a grisáceo de escasa coherencia. Los primeros análisis de este material indican que corresponde fundamentalmente a compuestos de alteración enriquecidos en cloro y plomo con distintas características texturales y composicionales. La presencia de este tipo de compuestos había sido ya puesto de manifiesto por anteriores estudios, tanto en el propio Pórtico de la Gloria como en otros enclaves de la catedral. En este mismo sentido, la experiencia acumulada durante muchos años nos ha permitido localizar este tipo de compuestos en otros enclaves: fachadas exteriores de monumentos, pintura mural, esculturas, rejas ornamentales, etc. La detección generalizada de estos compuestos nos hizo plantear su relación directa con las alteraciones observadas tanto en el soporte pétreo como, especialmente, en las capas de policromía, abordándose, en consecuencia, un estudio sistemático de ambos. Los principales datos obtenidos han sido los siguientes:

- Estos compuestos, aunque también aparecen directamente sobre el soporte granítico, están relacionados sobre todo con la policromía, siendo especialmente abundantes y problemáticos en las carnaciones. En estas capas se identifica una transformación de los compuestos originales de blanco de plomo (albayalde) en cloruros de plomo, progresando dicha transformación tanto desde la superficie externa como desde la superficie interna de las capas y apreciándose también microfracturas transversales rellenas de cloruros (figura 10). La alteración de estas encarnaciones implica, en los casos más extremos, la transformación a cloruros de plomo de hasta la mitad de las capas siguiendo un diseño simétrico, con las partes internas y externas alteradas y el núcleo sin alterar. Las zonas más alteradas se caracterizan por una mayor porosidad, microfisuración y descohesión interna y, como se ha señalado en el apartado de alteración de la policromía, en muchos casos, por ejemplo azul de lapislázuli, están sustentando a granos de policromía (figura 11).
- El análisis morfológico detallado de estos compuestos mediante microscopía electrónica de barrido revela la existencia de formas masivas, cristales de simetría ortorrómbica,

² Los pigmentos de plomo, al ser de naturaleza básica, reaccionan con los ácidos grasos libres de los aceites formando jabones de plomo (carboxilatos).

formas globulares y, sobre todo, formas tubulares a filamentosas frecuentemente ramificadas. La presencia de este amplio rango de morfologías parece indicar distintos procesos de cristalización, en unos casos relacionados con un origen inorgánico y, en otros, relacionados con actividad biológica.

- Aunque son necesarios estudios más precisos para determinar la mineralogía de estos compuestos, el análisis mediante difracción y microdifracción de rayos X nos indica la presencia de distintos minerales que incorporan cloro y plomo a su estructura atómica. En concreto se ha identificado fosgenita ($\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$), laurionita ($\text{PbCl}(\text{OH})$), paralaurionita ($\text{PbCl}(\text{OH})$) y cotunita (PbCl_2).

La presencia de distintos compuestos con cloro y plomo queda evidenciada por las variables relaciones de los picos de estos elementos en los espectros de microanálisis de rayos X.

- Es evidente que el plomo de estos compuestos estaría relacionado con los compuestos originales de plomo (blanco de plomo y en menor proporción minio); sin embargo, la presencia de cloro parece indicar una entrada generalizada de cloro de origen incierto. Así, este cloro podría relacionarse con aguas subterráneas o meteóricas cargadas en cloruros –poco probable por la ausencia de cloruro sódico en los paramentos– o con la aplicación de productos clorurados en intervenciones de lavado (jabones o lejías) o de eliminación del biodeterioro (cloruro de benzalconio o biocidas organoclorados). En relación con esta cuestión una investigación documental sobre las intervenciones realizadas en el Pórtico podría ser vital para determinar el origen de estos compuestos.

Sea cual sea el origen de estos compuestos, es absolutamente necesario conocer cuál es su estabilidad frente a variaciones de la humedad y la temperatura, así como establecer si el proceso de alteración es un proceso activo o fósil. Con este objetivo se han realizado distintos ensayos, partiendo de micromuestras de carnaciones alteradas y con un elevado contenido en cloruros de plomo. De una manera muy simplificada se han realizado dos ensayos, consistiendo el primero de ellos en el estudio de una carnación alterada tras ser sometida a un envejecimiento en cámara de humedad y temperatura (25 días con una temperatura de 14 °C y 90 % de humedad relativa, es decir, bajo condiciones de humedad ambiental elevada); el segundo ensayo planteado ha supuesto la inmersión de la muestra de carnación en agua desmineralizada. En ambos casos se han analizado las muestras antes y después de ser sometidas a las distintas condiciones, con el objetivo de valorar cambios en las mismas que impliquen procesos de disolución o de cambio de fase.

En el caso de la muestra de carnación sometida a un ambiente húmedo (90% de humedad relativa) las imágenes de microscopía electrónica indican, por una parte, la ausencia de procesos de disolución destacables, y por otra, la abundancia de compuestos enriquecidos en cloro y plomo con similar morfología antes y después del envejecimiento. Aparte de depósitos masivos de cloruros de plomo, son especialmente destacables morfologías globulares y filamentosas parcial o totalmente tapizadas por compuestos con cloro y plomo, que estarían relacionadas, respectivamente, con cianobacterias y con hifas de hongos con esporangios (figura 12).

En cuanto a la muestra introducida en agua, sí existen evidencias de cambios significativos. El análisis del extracto acuoso, evaporado sobre un vidrio, evidencia la existencia de un residuo de elevada higroscopicidad correspondiente a cloruro cálcico, con menores contenidos de yeso y halita, es decir, existe un importante lavado de iones cloro. El análisis mediante microscopía electrónica de las superficies inferior y superior también revela cambios significativos (figura 13): aunque siguen existiendo depósitos con cloro y plomo con la misma morfología de la carnación original, aparecen cloruros de plomo con morfologías de

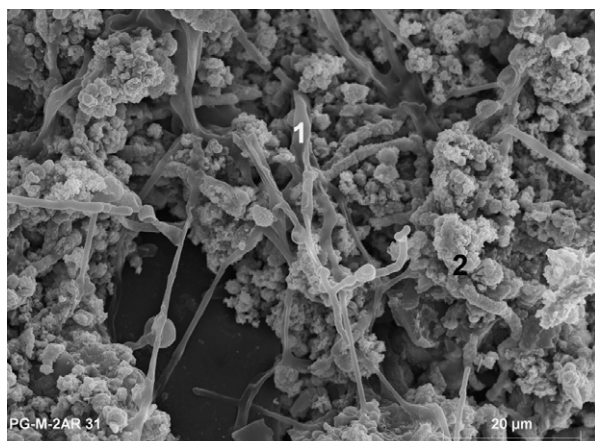


Figura 12. Imagen SEM de electrones secundarios en la que se identifican hifas de hongos (1) parcialmente recubiertas por compuestos enriquecidos en cloro y plomo (2).



Figura 13. Imagen SEM de cristales whiskers con altos contenidos en cloro y plomo que evidencian procesos de disolución y reprecipitación.

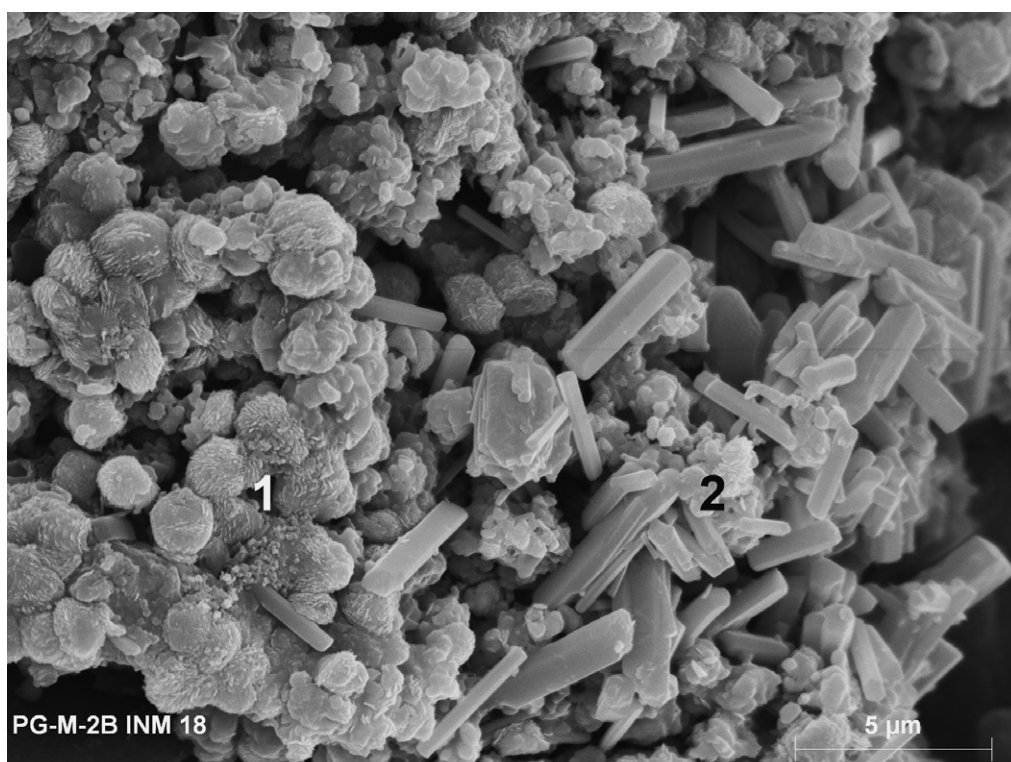


Figura 14. Imagen SEM de la muestra de encarnación, tras la inmersión en agua, en la que se observa la presencia de cristales neoformados de carbonato de plomo (1) y probable cotunita (2).

disolución y removilización y cristales prismáticos neoformados con morfología ortorrómbica –probable cotunita– (figura 14); además, parte de las estructuras que aparecían originalmente tapizadas por compuestos con cloro y plomo, aparecen tapizadas por compuestos de plomo –sin cloro– con micromorfologías en roseta (figura 15). Esta situación, coherente con los datos extraídos del estudio del extracto acuoso, parece evidenciar procesos de transformación de compuestos con cloro y plomo (posible fosgenita) en cerusita, con el consiguiente aumento de la porosidad.

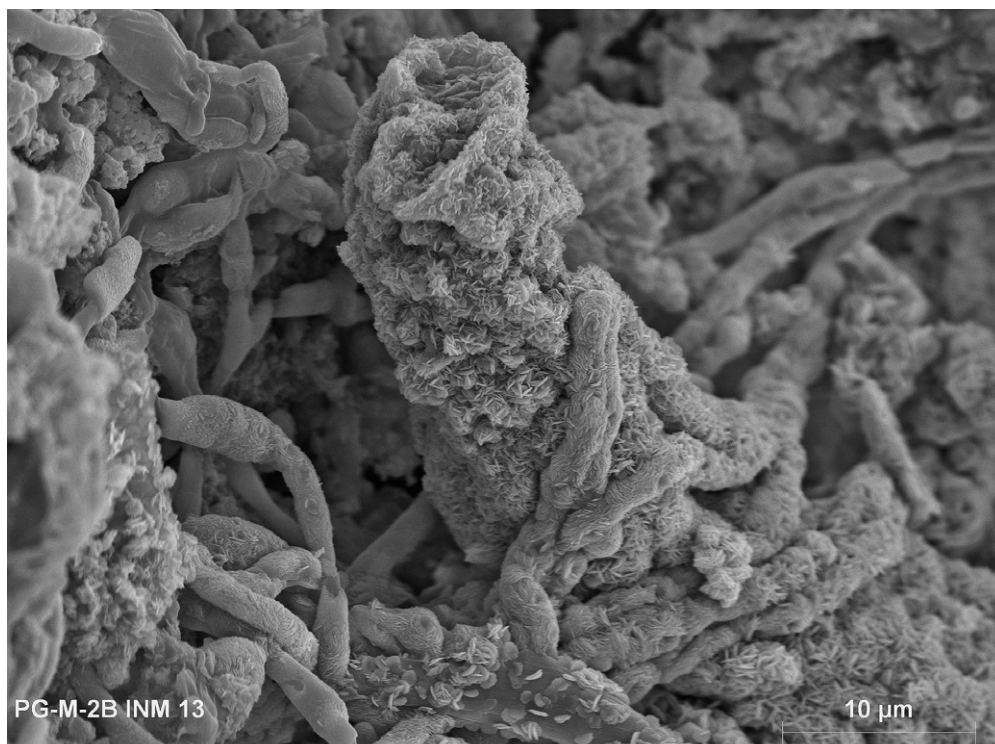


Figura 15. Imagen SEM que muestra estructuras de probable origen orgánico recubiertas por pequeños cristales lenticulares de carbonato de plomo, neoformado tras la inmersión de la muestra en agua.

Conclusiones

El estudio analítico de las alteraciones confirma que los daños que presenta el Pórtico de la Gloria son, en algunos casos, de extremada gravedad, no siendo posible en la mayoría de los casos vincularlos a un único factor desencadenante.

Los estudios de sales y humedad en el Pórtico indican la existencia de procesos generalizados de entrada de agua desde las edificaciones adjuntas. El control de los parámetros ambientales (temperatura y humedad relativa) se antoja un proceso imprescindible para conocer el estado inicial del Pórtico de la Gloria, las variaciones que se producen como consecuencia de las intervenciones realizadas y la respuesta de las esculturas –en especial la policromía– ante los cambios realizados.

La policromía, en gran parte, presenta un aspecto pulverulento y se desprende con facilidad. La imprimación más antigua, compuesta por albayalde, presenta en la mayoría de los casos un aspecto disgregado y está alterada a compuestos de cloro y plomo. La naturaleza lipófila del aglutinante (aceite de lino) contribuye al deterioro de la policromía debido a su envejecimiento y a la formación de los jabones de plomo. Hay capas de policromía donde existe una alteración de los pigmentos: en el caso de la azurita a un cloruro de cobre verde o una posible transformación química de la azurita a malaquita, y en las capas que contienen verdigrís se aprecia una coloración más parda en superficie por oxidación de sus componentes. Existen tonos verdes superficiales ligados a biocolonización. Por último, se analizan en algunas capas superiores estratos continuos y homogéneos de oxalatos cálcicos con presencia de proteína, hecho que podría estar relacionado con la aplicación en superficie de materiales proteicos y la posterior degradación de los mismos.

El biodeterioro, en función de los estudios realizados, tiene un carácter fundamentalmente epilitico, si bien no se puede hablar de una colonización extensiva o generalizada.

Se detecta una presencia generalizada de distintos compuestos con elevados contenidos en cloro y plomo; estos minerales, cloruros y clorocarbonatos de plomo, proceden de la degradación de los pigmentos originales de plomo –albayalde, fundamentalmente– y provocan un aumento de porosidad y descohesión interna en capas de policromía y encarnaciones. En relación con estos compuestos, es crítico determinar unas condiciones de estabilidad que impidan o minimicen procesos de disolución, reprecipitación o cambios de fases minerales que se traducirían en desplacaciones y descohesiones de las capas de policromía.

Por último, queremos señalar que la restauración de esta joya única del románico hay que entenderla como un proceso continuo que no se circunscribe exclusivamente a la intervención actual: los estudios previos han sido imprescindibles para la intervención material y el seguimiento y el control continuado, posteriores a la misma, serán herramientas necesarias para gestionar el delicado equilibrio del monumento.

Bibliografía

- BORRI, A.; BUSSI, L.; PROCACCI, L.; PACI, G.; CASTORI, G.; GIANNANTONI, A.; MENGhini, F.; CURTO, P.; VERRECCHIA, R., y MASELLI, G. (Universidad de los Estudios de Perugia), y SPERANDIO, B. (Coo. BE.C.) (2010): *Estudios estructurales*. Informes Programa Catedral.
- COO.BE.C. (2010): *Estudio estructural*. Informe Programa Catedral.
- DE LA TORRE, R. (2010): *Aspectos técnicos y constructivos del Pórtico de la Gloria*. Informe Programa Catedral.
- GARCÍA DE MIGUEL, J. M.^a; MORILLAS GONZÁLEZ, P., y PANIAGUA SERRANO, I. (2004): *Pórtico de la Gloria. Causas de deterioro*. Catedral de Santiago de Compostela. Cátedra de Petrología y Mineralogía, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- GEOARTEC (2016): *Estudio de sales y humedades en el nártex «Portico de la Gloria» de la Catedral de Santiago de Compostela*.
- GÓMEZ, M. L. (2000): *La restauración. Examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*. Madrid: Cátedra.
- HIGGITT, C.; SPRING, M., y SAUNDERS, D. (2003): «Pigment-medium Interactions in Oil Paint Films Containing Red Lead or Lead-tin Yellow». *National Gallery Technical Bulletin*, 24: 75-95.
- MATTEINI, M., y MOLES, A. (2001): *La química en la restauración: los materiales del arte pictórico*. Donostia-San Sebastián: Nerea.
- MORABITO, Z., y DRIUSSI, G. (2011): *Estudio del material pétreo (Caracterización petrográfica-mineralógica y determinación del deterioro)*. Arcadia Ricerche SRL. Informe Programa Catedral.
- MILLES, J. S., y WHITE, R. (1987): *The Organic Chemistry of Museum Objects*. Londres: Butterworths.
- PINA, C. M.; LÓPEZ-ANDRÉS, S.; RULL, F.; PRIETO, C.; FERNÁNDEZ-DÍAZ, L., y PRIETO, M. (1992): «Fenómenos de alteración y transformación fosgenita-cerusita». XII Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía. *Bol. Soc. Esp. Mineralogía*, 15 (1): 16-19.
- SÁNCHEZ-LEDESMA, A. Equipo Arte-Lab, S. L. (2010): *Estudio de los materiales presentes en micromuestras tomadas de las esculturas policromadas del Pórtico de la Gloria de la Catedral de Santiago de Compostela*. Informe Programa Catedral.

La restauración virtual. Aplicaciones a la conservación del patrimonio arqueológico

Dr. Francisco Javier Esclapés Jover

Profesor de Expresión Gráfica y miembro del Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico y del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
javier.esclapes@ua.es

Dr. Jaime Molina Vidal

Profesor Titular de Historia Antigua y miembro del Instituto Universitario de Investigación en Arqueología y Patrimonio Histórico y del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
jaime.molina@ua.es

Javier Muñoz Ojeda

Arqueólogo y miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
j.munoz@patrimoniovirtual.com

Laia Fabregat Bolufer

Arquitecta y miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
l.fabregat@patrimoniovirtual.com

Daniel Tejerina Antón

Arqueólogo y Conservador de BB.CC. Miembro del grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante
d.tejerina@patrimoniovirtual.com

Resumen: La restauración virtual se perfila como una disciplina auxiliar dentro de la conservación del patrimonio cultural y ofrece al especialista un gran volumen de información acerca de cualquier objeto o estructura, además de proporcionarle herramientas específicas para realizar intervenciones que no tendrán impacto sobre la obra original y cuyo resultado podrá ser analizado y compartido mediante técnicas de visualización avanzadas, cumpliendo estrictamente los criterios fundamentales de la ética de la conservación y restauración. En el área específica de la preservación de objetos o yacimientos arqueológicos, la restauración virtual proporciona soluciones eficaces en diferentes fases de intervención.

En este artículo proponemos una revisión de las técnicas más empleadas actualmente en restauración virtual, las perspectivas de desarrollo a corto y medio plazo y el impacto que esta joven disciplina auxiliar está generando dentro de la conservación de bienes culturales.

Palabras clave: Restauración virtual, realidad virtual, patrimonio cultural, gráficos por computador, arqueología.

Abstract: Virtual restoration arises as an auxiliary discipline within the conservation of cultural heritage and offers the expert a large amount of information about any object or structure, as well as a set of specific tools for interventions that will have no impact on the original work.

The results can be analyzed and shared through advanced visualization techniques, strictly complying with the principles of heritage conservation. In the case of archaeological heritage conservation, virtual restoration provides effective solutions in different phases.

In this paper, we propose a review of the most commonly used techniques in virtual restoration, short and medium term perspectives and the impact that this new auxiliary discipline is generating within the conservation of Cultural Heritage.

Keywords: Virtual restoration, virtual reality, cultural heritage, computer graphics, archaeology.

Introducción y propuesta de definición terminológica

En este momento, las técnicas empleadas para generar contenidos de realidad virtual se aplican a numerosas disciplinas, como la arquitectura, la medicina o la ingeniería. En el campo de las ciencias más directamente relacionadas con el patrimonio cultural, como la arqueología, el impacto de estas técnicas ha generado la aparición de una rama de especialización, a la que se suele hacer referencia con diferentes términos (arqueología virtual, virtualización del patrimonio, ciberarqueología), actualmente consolidada y valorada al mismo nivel que otras subdisciplinas, como la Arqueometría o la Zooarqueología.

Contemporáneamente, también la conservación del patrimonio cultural se beneficia de técnicas que permiten intervenir en diferentes fases de la protección, recuperación y salvaguarda del patrimonio mueble e inmueble y que nos permitirían hablar de conservación y de restauración virtual.

Antes de describir el flujo de trabajo y algunas de las herramientas empleadas a la hora de llevar a cabo un proyecto de restauración virtual, es necesario reflexionar acerca del valor que posee un tipo de intervención que –con la excepción de la impresión 3D– no trasciende la barrera de lo digital, lo que genera no pocas dudas y controversia acerca de la idoneidad y coherencia del propio término «restauración virtual». Ello se debe a que solemos identificar el concepto de lo virtual como opuesto a la realidad física. En este sentido, entre los autores que han teorizado acerca del valor de lo virtual es fundamental la obra de Pierre Levy, que subraya la concepción de lo virtual como opuesto a lo actual, pero no a lo real, constituyendo ambas dos categorías diferentes de la realidad (Levy, 1995). Lo virtual, desde este punto de vista, no guarda ninguna relación con «lo falso, lo ilusorio o lo imaginario, sino que se convierte en uno de los posibles modos de ser alternativo no a la realidad, sino a la actualidad» (Limoncelli, 2012: 17). Recordemos que la conservación del patrimonio cultural persigue, como principal objetivo, su salvaguarda a través de medidas y acciones que deberán respetar el significado y las propiedades físicas del bien cultural en cuestión, asegurando la accesibilidad a generaciones presentes y futuras; una vez aceptado como inexorable el progresivo deterioro de los materiales que constituyen los objetos con valor histórico y/o artístico –deterioro que podemos ralentizar, pero no detener–, y una vez asumido que cualquier intervención sobre estos materiales es transformadora e, incluso, eventualmente destructiva, se aprecian las ventajas de emplear métodos de trabajo no intrusivos, reversibles y que permiten generar réplicas virtuales que perdurarán en el tiempo y que pueden ser percibidas y disfrutadas a través de nuestros sentidos. Réplicas que constituyen otro tipo de materialidad, compatible con aquella materialidad física de los objetos que nos rodean, a la que puede complementar e incluso –en determinados aspectos– enriquecer y mejorar.

Actualmente, la conservación del patrimonio cultural comprende tres tipos de intervención: la conservación preventiva, la conservación curativa y la propia restauración (VV. AA., 2008), dentro de la cual, como disciplina auxiliar, debería integrarse lo que entendemos como restauración virtual. Y la misma definición empleada para la restauración física –«todas aquellas acciones aplicadas de manera directa a un bien individual y estable, que tengan como objetivo facilitar su apreciación, comprensión y uso. Estas acciones solo se realizan cuando el bien ha perdido una parte de su significado o función a través de una alteración o un deterioro pasados. Se basan en el respeto del material original. En la mayoría de los casos, estas acciones modifican el aspecto del bien» (VV. AA., 2008)– se puede adaptar, en términos generales y con matices, a la de restauración virtual.

Revisión de las principales técnicas empleadas

Proponemos una clasificación en función del tipo de intervención, partiendo así de la fase inicial de documentación del estado de conservación, continuando con los tipos de intervención más habitualmente empleados en 2D y 3D y terminando con las opciones de visualización de los resultados obtenidos.

El paso previo: técnicas de documentación

Desde el origen de la propia arqueología como ciencia ha existido una preocupación por la documentación rigurosa de objetos y estructuras exhumados durante el proceso de excavación. Inicialmente, esta fase se llevó a cabo a través de la representación gráfica manual, que se vio complementada –desde el segundo tercio del siglo XIX– con la imagen fotográfica y el diseño asistido por ordenador (CAD). Solo en el último tercio del siglo XX se producen los primeros casos de aplicación al patrimonio cultural de tecnologías y dispositivos que permiten la obtención de modelos tridimensionales: la tomografía axial computerizada (TAC), el escáner 3D y la fotogrametría.

Es, sin embargo, a partir del cambio de siglo cuando asistimos a un uso creciente de técnicas de documentación 3D, principalmente a través de dos grandes familias que podemos clasificar en función del tipo de sensor empleado:

- Sensores activos sin contacto: emiten radiación sobre el objeto –sin necesidad de que exista contacto con el mismo– para medir la reflexión generada:
 - Escáneres de tiempo de vuelo.
 - Escáneres de diferencia de fase.
 - Escáneres de triangulación óptica.
 - Escáneres de luz estructurada.
 - Escáneres de luz modulada.
- Sensores pasivos: no emiten radiación, pero son capaces de captar la radiación ambiental reflejada en los objetos:
 - Cámara fotográfica + software SfM (*Structure from Motion*).

Este último grupo, que evoluciona a partir de los principios de la fotogrametría –prácticamente tan antigua como la propia técnica fotográfica– y se beneficia de los avances en visión por computador (*Computer Vision*) y en hardware (sensores para la captura de imágenes fo-

tográficas, CPU y GPU más sofisticados, potentes y veloces), es el que durante los últimos años ha vivido una mayor expansión, hasta el punto de constituir actualmente una herramienta plenamente integrada en la práctica totalidad de los proyectos de excavación arqueológica y, en general, de cualquier intervención sobre el patrimonio cultural que incluya una fase previa de documentación. Para un correcto levantamiento 3D es necesario seguir una sencilla metodología en la que aquí no nos detendremos. A modo de resumen, indicaremos que a través de la captura de imágenes con una amplia área de solape entre sí y su posterior procesado se obtiene un modelo 3D texturizado del objeto o estructura a documentar.

Entre los motivos que han llevado a la expansión en el uso de las técnicas SfM debemos destacar los siguientes:

- Coste reducido respecto a otro tipo de sensores y técnicas.
- Rápido aprendizaje y sencillez de uso.
- Versatilidad a la hora de documentar prácticamente cualquier tipo de superficie.

Para la documentación de grandes superficies y zonas de difícil acceso –como cubiertas de edificios– es necesario utilizar equipo de apoyo para la elevación y el transporte de la cámara, como pértigas o vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés), y de cara a la correcta geolocalización de los modelos tridimensionales también es habitual la utilización de estación total y GPS diferencial.

Prescindiendo del tipo de sensor y técnica empleados, la obtención de un modelo tridimensional completo de objetos, estructuras o yacimientos arqueológicos en su estado original debe convertirse en el primer objetivo de cualquier intervención sobre el patrimonio cultural. Recordemos que «la excavación arqueológica constituye una herramienta fundamental para el estudio de la historia, pero es una acción destructiva» (Tejerina, 2016); la consolidación y puesta en valor de yacimientos y objetos arqueológicos, por su parte, es también, inevitablemente, transformadora. En España, por motivos que no abordaremos aquí, el patrimonio arqueológico suele ser objeto –sobre todo en el caso de yacimientos, pero también de piezas– de intervenciones que modifican visiblemente su aspecto y características originales. En este contexto y sin entrar a juzgar esta realidad, nos limitamos a subrayar el valor incalculable que adquiere el modelo tridimensional como testimonio del estado original del bien cultural y como herramienta insustituible de cara a estudios, análisis o intervenciones posteriores. Y aunque ya desde la redacción de la Carta de Venecia se recoge la obligación de documentar de manera precisa cualquier intervención sobre el patrimonio cultural (VV. AA., 1964: 3), sería de gran utilidad una actualización de las leyes de protección del patrimonio cultural, incorporando la obligatoriedad de aportar este tipo de información en la documentación que habitualmente ha de constar en la memoria de intervención.

Aunque nos hemos centrado aquí en las técnicas que permiten la obtención de modelos tridimensionales a partir de la utilización de diferentes sensores, existen otras técnicas de documentación, como la fotografía de alta resolución o, dentro de la teledetección, la utilización y análisis de imagen multispectral e imagen de bandas no visibles del espectro (infrarrojo o ultravioleta), también muy útiles en intervenciones de conservación y restauración virtual y particularmente eficaces en casos específicos como la documentación de pinturas rupestres, pero su aplicación al patrimonio cultural no es reciente (LIANG, 2012: 1) y cuenta con una extensa bibliografía.

Entre los principales beneficios que aporta la documentación 3D al conservador destacamos los siguientes (obviando aquellos otros más relacionados con la puesta en valor y la difusión):

- Obtención de una réplica virtual, útil en casos de desaparición, destrucción o modificación del objeto o estructura original por causas naturales o antrópicas. A partir de esta réplica es posible obtener otros productos derivados, como el levantamiento planimétrico completo o la elaboración de una cartografía tridimensional de alteraciones y patologías.
- Monitorización continua del estado de conservación: esta estrategia, a la que se suele hacer referencia con el concepto de 4D (al añadir la dimensión del tiempo al modelo 3D espacial), es fundamental para la conservación preventiva, al permitir comparar resultados en diferentes períodos de tiempo y realizar un diagnóstico más acertado del estado de conservación o el seguimiento de intervenciones anteriores.



Figura 1. Ejemplos de obtención de modelos 3D a través de la técnica *Structure from Motion*. Yacimiento arqueológico inca de Aypate (Perú). Grupo de Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante.

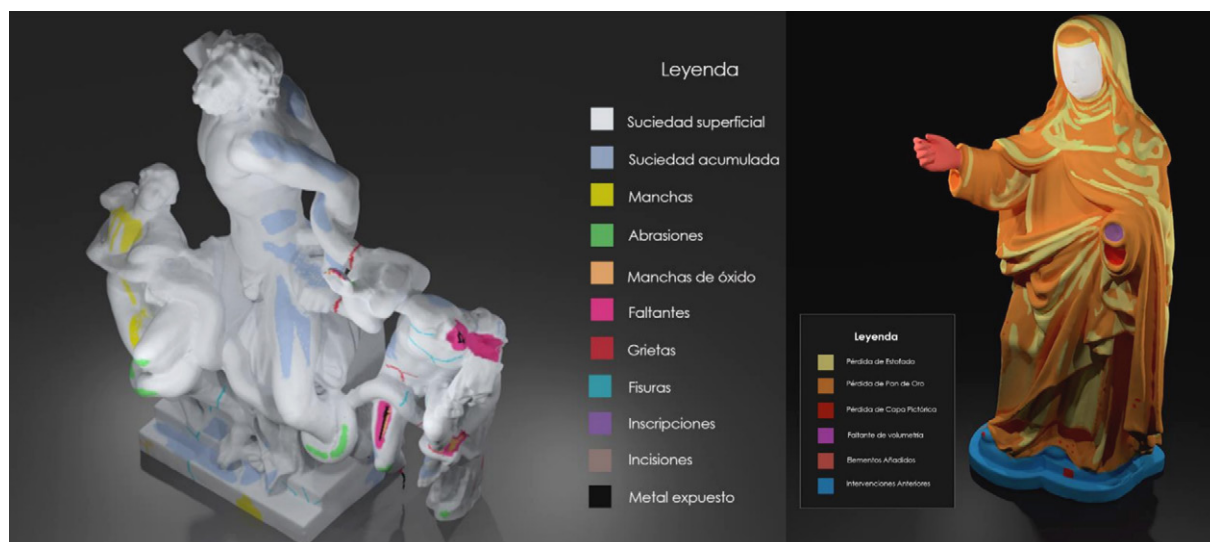


Figura 2. Creación de mapas de patologías sobre modelos 3D. Autora: Lorena Olazabal Furuya. Trabajo Fin de Máster en Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante, 2016.

Limpieza y reintegración volumétrica y cromática

a) Infografía 2D

Dentro de este epígrafe incluimos todas aquellas técnicas y herramientas que permiten la edición y modificación de una imagen, prescindiendo de si el objeto representado está realizado en un soporte bidimensional o tridimensional. Este tipo de intervenciones se llevan a cabo ya desde la última década del siglo xx y el motivo es la aparición y popularización de los primeros software de edición 2D, más temprana –década de 1990– respecto a la del software de edición 3D, así como una menor exigencia de recursos de hardware respecto a las técnicas de representación tridimensional.

En este apartado se integran todas aquellas herramientas destinadas a reproducir en un entorno digital algunas de las operaciones que se llevarían a cabo en una intervención física:

- Estudios previos:
 - Creación de mapas de patologías organizados y clasificados en capas de información (factores químico-físicos, antrópicos o biológicos).
 - Diferenciación de fases constructivas y caracterización de materiales empleados.
 - Análisis a través de la aplicación de filtros específicos.
- Intervención:
 - Limpieza selectiva.
 - Reintegración volumétrica.

b) Infografía 3D

Dentro de este término incluimos todos aquellos procesos que cubre el flujo de trabajo habitual en un proyecto de restauración virtual 3D:



Figura 3. Limpieza virtual de placa de marfil a través de la utilización de herramientas de infografía 2D. Autora: Mónica Sánchez. Extraído de Trabajo Fin de Máster en Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante, 2016.

- Importación, limpieza decimación y retopología de mallas obtenidas previamente en un levantamiento 3D.
 - Estudio y análisis del objeto a través de la información que proporciona la réplica virtual y diagnóstico del estado de conservación; elaboración de la cartografía de la pieza y de mapas tridimensionales de patologías.
 - Anastilosis virtual en el caso de piezas fragmentadas durante el proceso previo de documentación.
 - Limpieza de la réplica virtual sobre las texturas proyectadas en el modelo 3D.
 - Identificación de lagunas, fisuras, grietas y partes faltantes y reintegración volumétrica y cromática de las mismas.
 - Optimización de la geometría y textura del modelo 3D en función de su uso posterior.
- Impresión 3D: se dará preferencia a la coherencia geométrica y topológica de la pieza de cara a su correcta impresión.
 - Visualización en tiempo real: se buscará obtener una copia a baja resolución (bajo número de polígonos) que mantenga, en la medida de lo posible, la apariencia del objeto original a alta resolución.
 - *Render* fotorrealista: se priorizará la fidelidad del modelo 3D respecto al objeto original, con geometrías y texturas a alta resolución y una cuidada estrategia de iluminación.

c) *Camera mapping/projection mapping*

Mediante estas dos denominaciones nos referimos a una técnica que permite el modelado de geometría a partir de una única imagen, proyectando esta –a modo de textura– sobre la geometría generada. Se trata de una técnica que –en el ámbito de la restauración virtual–

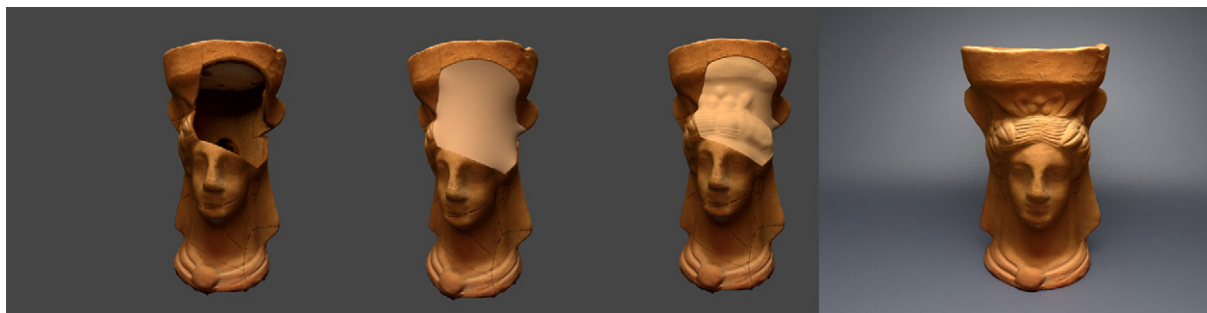


Figura 4. Ejemplo de reintegración volumétrica virtual a través de técnicas de modelado 3D. De izquierda a derecha: estado de conservación previo tras proceso de anastilosis virtual; reintegración volumétrica con prótesis no mimética; reintegración volumétrica con prótesis semimimética, y restauración integral con acabado mimético. Grupo de Patrimonio Virtual, Universidad de Alicante.

encuentra aplicación en la utilización de cualquier tipo de imagen representada en un soporte bidimensional –una fotografía o una obra pictórica, por ejemplo– de espacios que ya no existen o cuyo aspecto ha sido modificado o alterado. En primer lugar se analiza la información espacial de la que disponemos en la imagen para, a continuación, editarla en 2D, seleccionando y aislando todos y cada uno de los elementos que posteriormente se verán afectados por el desplazamiento de la cámara virtual. Una vez importada la información en un software de infografía 3D, se genera un espacio virtual tridimensional, en el cual se procede a ubicar y orientar cada uno de los elementos previamente aislados. Para simular una profundidad que en la imagen original no existe, esta fase también incluye la utilización de herramientas habituales, como el clonado de formas y texturas existentes o la generación de otras nuevas si disponemos de información o hipótesis de restitución; de este modo será posible cubrir y rellenar los espacios no visibles en la imagen original, pero sí en el recorrido de cámara final.

En este caso, el proceso de restauración virtual se puede llevar a cabo indistintamente durante la fase de trabajo en 2D o 3D.

d) Camera tracking/motion tracking/match moving/camera solving

Esta técnica, a la que se hace referencia con cualquiera de estas cuatro denominaciones y ampliamente utilizada en la industria del cine digital, permite integrar contenido sintético –generado por ordenador– 2D/3D en una secuencia de vídeo real, generando además una cámara virtual (y su correspondiente movimiento). Su funcionamiento se basa en los principios de la fotogrametría –la determinación de puntos en el espacio a partir de dos o más imágenes que comparten un área de solape entre sí– y el paralaje –si observamos un paisaje desde un punto y nos desplazamos hacia un lado, los objetos más cercanos a nosotros parecerán desplazarse más deprisa respecto a los más lejanos–, y se hace especialmente útil en restauración virtual como complemento al fotomontaje 2D, al que supera en volumen de información y sensación de profundidad y perspectiva, puesto que con esta técnica se incluye desplazamiento.

Al igual que en la documentación 3D a través de fotogrametría o SfM, la creación de un proyecto de rastreo o seguimiento de cámara (*camera tracking*) exige ciertos requisitos, como la planificación de la grabación de la secuencia o la presencia en la escena de elementos característicos (*features*) naturales o artificiales (dianas) que el software pueda posteriormente rastrear y en los que nos podamos apoyar para la reconstrucción 3D del espacio. Dependiendo de la complejidad del proyecto y de las características del vídeo real grabado, el proceso

será más o menos automático (en la fase de creación y rastreo de *trackers* por parte del software) o manual (será el usuario el que deba realizar esta tarea). También es necesario disponer de información acerca de la geometría de la lente y el tamaño del sensor que hemos empleado para corregir la distorsión del vídeo y determinar el movimiento de la cámara y la posición espacial de cada objeto de la escena por proyección inversa. Una vez generado con éxito el espacio tridimensional a partir del vídeo, se integran en él los objetos 2D o 3D previamente diseñados y texturizados, junto con la iluminación adecuada. Para que esta integración sea correcta, debe completarse con una fase de composición (*compositing*) antes de la representación (*render*) final. Por último, añadiremos que en este tipo de proyectos suele ser habitual llevar a cabo máscaras de selección dinámicas para aislar y recortar elementos de la escena, lo que se conoce como *rotoscopy*.

La multiplicación de software –algunos de ellos gratuitos, como Blender– capaces de llevar a cabo proyectos de *camera tracking*, el auge de vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones), o la miniaturización y abaratamiento de sensores de imagen de alta resolución (full HD, 4K e incluso superiores) han convertido esta técnica en una herramienta que ya se aplica con cierta frecuencia en arqueología virtual de cara a la difusión y puesta en valor de yacimientos arqueológicos y edificios y monumentos históricos. Consideramos, sin embargo, que existen posibilidades interesantes en el ámbito más específico de la restauración virtual, con numerosas aplicaciones de las que destacamos aquí una: su utilización para mostrar –en el propio proyecto de actuación– el resultado de intervenciones de consolidación en yacimientos arqueológicos; es decir, antes de que esta se lleve a cabo y como parte de la documentación aportada para su valoración, lo que en muchos casos podría ayudar a prevenir y evitar resultados no deseados. Porque es cierto que la reversibilidad de las intervenciones sobre yacimientos arqueológicos, un tema siempre complejo, es –desde un punto de vista teórico– posible, pero será siempre costosa, compleja y traumática para los restos originales conservados.

Visualización de los resultados

a) Visualización no interactiva

Dentro de este epígrafe incluimos aquellas técnicas que no permiten al usuario una interacción en tiempo real con la información representada.

Render

Con este término hacemos referencia a la representación de una escena 3D como resultado del cálculo de la interacción entre las fuentes de iluminación generadas y los objetos presentes en dicha escena (y en función también de los parámetros definidos y configurados previamente por el usuario). Esta representación puede ser en formato de imagen o de secuencia de imágenes (vídeo) y constituye el tipo de representación más habitual de contenidos –a través de pantallas y paneles impresos– en museos y yacimientos arqueológicos por la relativa sencillez y bajo coste de creación respecto a otras técnicas de visualización.

Video mapping/projection mapping

El *video mapping* es actualmente una de las técnicas con mayores posibilidades de aplicación en el campo de la restauración virtual y si su utilización en este campo es aún testimonial es debido principalmente al alto coste de adquisición o alquiler de proyectores con las características y calidad requeridas para este tipo de proyectos. Como hemos señalado en el caso de otras técnicas digitales, también aquí es necesario diferenciar claramente entre aquellas

intervenciones destinadas a la difusión y a la puesta en valor de un monumento o edificio histórico, que resultan de una gran utilidad para dar a conocer y ayudar a comprender el patrimonio cultural, respecto de aquellas en las que podamos emplear, de un modo riguroso, el término de «restauración virtual».

El motivo de haber clasificado esta técnica dentro del apartado de visualización de los resultados se debe a que, si bien comprende la utilización de técnicas de infografía 2D y 3D para llevar a cabo la restauración virtual de objetos o estructuras, se trata fundamentalmente de una herramienta orientada a la visualización de los resultados. Un proyecto de videomapping incluye la obtención previa de un modelo tridimensional del soporte original, utilizando cualquiera de las técnicas mencionadas en el punto 1 de este documento. Sobre este modelo es posible llevar a cabo una intervención de restauración virtual 2D/3D, tanto de la estructura (pilares, muros o bóvedas, entre otros), como de los elementos ornamentales (escultura y pintura). Paralelamente a este proceso, se lleva a cabo una compleja planificación que incluye el cálculo del número de proyectores, su posición y la distribución –por cada proyector– de la información a proyectar.

Aunque existen casos bien documentados de utilización de *video mapping* aplicado a la visualización del patrimonio cultural (Martin *et al.*, 2014; Peral *et al.*, 2005), el ejemplo paradigmático de su aplicación a la restauración virtual lo constituye la magnífica intervención sobre el ábside mayor y el presbiterio de la nave central de la iglesia de Sant Climent de Taüll (Taüll, Lleida) en 2013. La propia morfología de la estructura, así como la localización de los frescos originales –arrancados para su preservación a principios del siglo xx y expuestos en el MNAC– entre otros, planteaban un reto de gran complejidad, solventado gracias a una estrategia integral que incluyó no solo la documentación tridimensional del espacio, sino también la obtención de imágenes a alta resolución de los frescos originales, sobre los que se llevó a cabo un minucioso trabajo de restauración y reconstrucción virtual y que fueron finalmente proyectados como textura sobre el modelo 3D. También es necesario destacar –aunque trascienda los límites estrictos de la restauración virtual y, por tanto, de este artículo– el trabajo de puesta en valor y difusión, que incluyó el repintado de los frescos, la elaboración de didácticas animaciones que toman como protagonistas las figuras y personajes representados y el laborioso proceso de creación de una particular banda sonora. Como resultado, esta intervención obtuvo el premio al mejor proyecto multimedia en el congreso Museums and the Web, celebrado en Baltimore y que premia cada año los mejores ejemplos mundiales de proyectos digitales en el sector de museos y patrimonio cultural.

b) Visualización dinámica: entornos de realidad aumentada y realidad virtual

Este segundo apartado comprende aquellas técnicas que permiten al usuario una interacción en tiempo real con la información representada, en un entorno completamente sintético (realidad virtual) o con elementos agregados a la realidad física (realidad aumentada). Ambos tipos de entorno proporcionan una experiencia más inmersiva respecto al *render* o la proyección, con la ventaja de que podemos interactuar en tiempo real con el entorno o con determinados elementos del mismo, obteniendo a cambio información.

Se trata de una técnica menos empleada que las representaciones o *render* de imágenes o vídeos, debido a la mayor complejidad de este tipo de proyectos y los requisitos necesarios para la creación de este tipo de contenidos:

- Hardware: dispositivos de percepción (vista, tacto, oído) y movimiento.
- Software: habitualmente se emplean motores de juego (*game engine*) para la creación de la física, la lógica y la interacción del entorno generado.

A pesar de ello, los avances en hardware (la miniaturización y ergonomía de dispositivos) y en software (mayor interacción, inmersión y realismo dentro del espacio generado) la convierten en una herramienta fundamental para la visualización en tiempo real de cualquier tipo de información.

c) *La impresión 3D*

La impresión 3D, por sus propias características y el tipo de resultados que proporciona, constituye en sí una categoría específica. En sentido estricto, sería más correcto hablar de tecnologías de fabricación por adición, dentro de cuya categoría se encontraría la impresión 3D; sin embargo, la mayor disponibilidad, menor coste y sencillez de uso han convertido la impresión 3D en la opción más empleada a la hora de generar una réplica física de un objeto virtual.

Por lo que respecta a su aplicación a la restauración virtual, hoy en día –y en combinación con técnicas de modelado 3D– es posible imprimir cualquier tipo de geometría en diferentes materiales, inocuos y compatibles con el material arqueológico original, lo que representa una gran oportunidad a la hora de realizar reintegraciones volumétricas de cualquier tipo de pieza. En aquellos casos en los que la reintegración no vaya a cumplir un rol estructural, la posibilidad de imprimir sobre materiales con cierta deformabilidad permite además facilitar la colocación de los fragmentos impresos en la pieza original. En general, ya sea con materiales rígidos o flexibles, un correcto flujo de documentación 3D y modelado 3D facilitaría el montaje y desmontaje de manera sencilla y sin perjuicio de la pieza original, evitando la aplicación de sustancias para la protección de aristas.

La documentación del proceso de intervención

Al igual que en la restauración física de objetos y estructuras arqueológicas, también aquí es necesario documentar de manera exhaustiva la intervención en todas y cada una de las fases realizadas y de las decisiones tomadas, así como su justificación, por lo que se debe incluir la procedencia, características y grado de fiabilidad de las fuentes empleadas. Y es importante que esta información esté disponible para su consulta, evaluación y/o validación por parte de cualquier persona interesada. En este sentido existen ya algunas propuestas de creación de protocolos para su utilización en proyectos de arqueología virtual que pueden ser aplicados también en intervenciones de restauración virtual, como la *Extended Matrix* (Demetrescu, 2016), que propone un sistema de documentación equivalente a lo que se conoce como matriz de Harris, la herramienta más empleada para la documentación de excavaciones arqueológicas. Otra propuesta para la normalización en proyectos de este tipo lo constituyen las denominadas UR (unidades reconstructivas), basadas en la utilización de fichas «que contengan los datos básicos de referencia, descriptores, hipótesis fundamentadas, evidencias e hipótesis descartadas que sostengan la interpretación en la que se basa la reconstrucción virtual» (Molina y Muñoz, 2014). Por último, mencionamos también la escala de evidencia histórica (Aparicio, 2014), una herramienta que permite al ilustrador atribuir un grado de evidencia histórica –en función de una escala cromática– para cada elemento representado.

Conclusiones

En la Carta de Venecia se nos recuerda explícitamente –en el artículo n.º 2– que la conservación del patrimonio «se sirve de todas las ciencias y técnicas que puedan contribuir al estudio y a la salvaguardia del patrimonio monumental» (VV. AA., 1964: 1). Examinando con perspec-

tiva la evolución de esta disciplina, es fácil comprobar que así ha ocurrido, de tal modo que se han sabido incorporar los avances en diferentes áreas de conocimiento (biología, química, física o geología, entre otras) sin las cuales no sería posible comprender hoy la ciencia que protege nuestro patrimonio. En este momento y en la misma línea asistimos a un nuevo aporte de conocimientos, procedentes de técnicas que pueden ayudar a mejorar, agilizar y automatizar algunos procesos que aún hoy se llevan a cabo de un modo artesanal y que pueden llegar a provocar lesiones en los objetos sobre los que se está interviniendo: «La reintegración volumétrica sigue siendo uno de los aspectos más controvertidos entre arqueólogos, conservadores y restauradores, ya que son aún muchos los profesionales que defienden y abogan por la reintegración indiscriminada del objeto [...]» (Carrascosa, 2009: 141-142). En este sentido, las posibilidades que nos ofrece la combinación de técnicas de documentación, modelado o impresión 3D pueden cambiar y mejorar el modo en que los futuros especialistas llevarán a cabo este tipo de trabajos.

Como conservadores, la cada vez mayor sofisticación de las técnicas de creación y visualización de contenidos virtuales y la posibilidad de generar réplicas virtuales de gran fidelidad respecto a los objetos originales deben llevarnos a reflexionar sobre el verdadero valor de la obra de arte o del bien cultural, explorando nuevas opciones de análisis, intervención y visualización que protejan la obra original, respetando su integridad y evitando cualquier actuación innecesaria. Al mismo tiempo, restaurador y visitante deberán plantearse el valor de la réplica virtual, apreciando su apariencia –mímesis del objeto original– y su eficaz papel como transmisor de su intrínseco valor histórico y artístico.

Señalamos, para concluir, algunas de las líneas en las que consideramos que deberían realizarse progresos para una mayor consolidación de esta joven disciplina:

- La mejora de procesos de automatización en la documentación 3D de objetos arqueológicos: actualmente es posible llevar a cabo la documentación de una pieza arqueológica en tiempos relativamente cortos que, sin embargo, continúan resultando inviables de cara a la documentación masiva de los fondos presentes en los museos arqueológicos (y que constituyen en muchos casos un auténtico *tesoro oculto* aún por explotar de estas instituciones). Únicamente la unión y automatización de los dos procesos que intervienen en la documentación 3D por técnicas SfM –la captura fotográfica y el procesamiento de imágenes– harán posible su viabilidad en proyectos de documentación a media y gran escala.
- El avance en los procesos de automatización en infografía 3D aplicada a la restauración virtual, fundamentalmente en dos líneas:
 - La retopología de mallas procedentes de escáner 3D y SfM.
 - Actualmente es posible detectar y seleccionar de un modo automático lagunas en un objeto 3D. La fase posterior de reintegración de estas partes faltantes, en cambio, necesita aún desarrollarse para ser satisfactoria.
- La búsqueda de nuevos materiales y sistemas de impresión 3D, basada en el estudio y caracterización de los principales materiales empleados para la fabricación de objetos a lo largo de la historia. El estudio de sistemas de adhesión y unión entre las piezas impresas en 3D y las piezas originales.
- Por último, mencionamos también la necesidad de incorporar formación específica en restauración virtual para los futuros conservadores, algo hoy prácticamente inexistente, lo que obstaculiza un cambio sustancial en los procesos de trabajo actuales y obliga al especialista a buscar una formación no específica para después intentar adaptarla a su propio flujo de trabajo.

Bibliografía

- CARRASCOSA, B. (2009): *La conservación y restauración de objetos cerámicos arqueológicos*. Madrid: Tecnos.
- DEMETRESCU, E. (2015): «Archaeological stratigraphy as a formal language for virtual reconstruction. Theory and practice» [en línea]. *Journal of Cultural Heritage*, vol. LVII, pp. 42-55. Disponible en: <<http://osiris.itabc.cnr.it/extendedmatrix/index.php/downloads/>> [consulta: 10 de noviembre de 2016].
- LEVY, P. (1995): *Qu'est-ce que le virtuel?*. París: La Découverte.
- (2001): *Cyberculture*. University of Minnesota Press.
- LIANG, H. (2012): «Advances in multispectral and hyperspectral imaging for archaeology and art conservation». *Appl Phys A*, 106: 309-323.
- LIMONCELLI, M. (2012): *Il restauro virtuale in archeologia*. Roma: Carocci editore.
- MAPPING SANT CLIMENT DE TAÜLL/PANTOCRATOR (2013): [en línea]. Lugar de publicación: [Internet] Disponible en: <<http://pantocrator.cat/es/>> [consulta: noviembre de 2016].
- MARTÍN, P.; LLAMAS, J.; GÓMEZ-GARCÍA-BERMEJO, J.; ZALAMA, E., y CASTILLO, J. (2014): «Using 3D digital models for the virtual restoration of polychrome in interesting cultural sites» [en línea]. *Journal of Cultural Heritage*, vol. XV, pp. 196-198. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1296207413000927>> [consulta: 20 de noviembre de 2016].
- MOLINA, J.; ESCLAPÉS, J.; FABREGAT, L.; MUÑOZ, J., y TEJERINA, D. (2012): Sitio web oficial del programa de estudios en Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante [en línea]. Lugar de publicación: [Internet] Disponible en: <www.patrimoniovirtual.com> [consulta: diciembre de 2016].
- MOLINA, J., y MUÑOZ, J. (2014): «Normalización de proyectos en virtualización del patrimonio: UR - Unidades de Reconstrucción» [en línea]. Blog del sitio web del Grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante. Disponible en: <<http://www.patrimoniovirtual.com/2014/11/27/normalizacion-de-proyectos-en-virtualizacion-ur-unidades-de-reconstruccion/>> [consulta: diciembre de 2016].
- PERAL, R.; SAGASTI, D., y SILLAUREN, S. (2005): «Virtual restoration of Cultural Heritage Through Real Time 3D Models Projection» [en línea]. *The 6th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. Pisa: The Eurographics Association. Disponible en: <<http://public-repository.epoch-net.org/publications/VAST2005/shortpapers/short2002.pdf>> [consulta: 3 de diciembre de 2016].
- TEJERINA ANTÓN, D. (2016): «La restauración virtual y su aportación a la conservación y restauración de bienes culturales I» [en línea]. Blog del sitio web del Grupo de Patrimonio Virtual de la Universidad de Alicante. Disponible en: <<http://www.patrimoniovirtual.com/2016/11/02/la-restauracion-virtual-y-su-aportacion-a-la-conservacion-y-restauracion-de-bienes-culturales-i/>> [consulta: diciembre de 2016].
- VV. AA. (2008): «Terminología para definir la conservación del patrimonio cultural tangible» [en línea]. Biblioteca Virtual FAHUSAC. Disponible en: <<http://bvhumanidades.usac.edu.gt/items/show/1806>> [consulta: 27 de noviembre de 2016].
- VV. AA. (1964): «Carta de Venecia» [en línea]. Instituto del Patrimonio Cultural de España. Disponible en: <http://ipce.mcu.es/pdfs/1964_Carta_Venecia.pdf> [consulta: 3 de noviembre de 2016].

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

Microscopía de fuerza atómica como herramienta de caracterización de superficies fotográficas

Alejandra Nieto Villena

Facultad del Hábitat. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México/
 Doctorado en Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universitat Politècnica de València
 alejandra.nieto@uaslp.mx

José Refugio Martínez Mendoza

Facultad de Ciencias y Departamento de Físico-Matemáticas.
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 flash@fciencias.uaslp.mx

José Ángel de la Cruz Mendoza

Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 negro@fciencias.uaslp.mx

Juan Valcárcel Andrés

Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales. Universitat Politècnica de València
 jvalcara@crbc.upv.es

Gerardo Ortega Zarzosa

Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 gortega@fciencias.uaslp.mx

Azdrúbal Lobo Guerrero

Instituto de Física y Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 azdlobo@gmail.com

José Manuel Flores Camacho

Instituto de Investigación en Comunicación Óptica (IICO). Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
 jmflores@cactus.iico.uaslp.mx

Resumen: En el presente trabajo se evalúa la factibilidad de la microscopía de fuerza atómica (AFM) como herramienta para la identificación de procesos fotográficos históricos a partir del estudio de sus superficies. El análisis de estos bienes culturales requiere de mayor profundización en la aplicación de técnicas científicas no invasivas que complementen los métodos de identificación actuales.

A través de AFM se han podido distinguir dos tipologías de superficie asociadas a procesos fotográficos, una de ellas a la albúmina y colodión y otra a la gelatina, aglutinantes presentes en estos artefactos desde finales del siglo XIX. Mediante espectroscopía infrarroja (FTIR) se ha logrado corroborar la existencia de estos compuestos y otros estratos subyacentes como la capa de barita.

Los resultados obtenidos proporcionan una valiosa información que contribuye a optimizar la metodología de identificación de superficies fotográficas dando pie a una mejor comprensión de su estructura con base científica.

Palabras clave: Procesos fotográficos, AFM, caracterización, aglutinantes, superficie.

Abstract: The aim of this study is to evaluate the atomic force microscopy (AFM) as a tool for identifying historical photographic processes through the study of their surfaces. The analysis of these cultural heritage requires greater depth in the application of non-invasive scientific techniques as a complement of current methods of identification.

Through AFM have been able to distinguish two types of surface photographic processes associated with albumen, collodion and gelatin, binders present in these devices since the late s. XIX. Through infrared spectroscopy (FTIR) it has been achieved corroborate the existence of these binders and other underlying layer as baryta layer.

The results provide valuable information that helps to optimize the methodology for identifying photographic surfaces giving rise to a better understanding of its structure with scientific basis.

Keywords: Photographic processes, AFM, characterization, binders, surface.

Introducción

El desarrollo técnico que buscaba incansablemente la fijación de la imagen se basó en la experimentación con materiales de diversa naturaleza. Se utilizaron soportes como el vidrio, el metal o el papel, y se emplearon pigmentos, barnices y sales de hierro, platino y plata para conseguir grabar la escena sobre el soporte.

A finales del siglo XIX la reproducción fotográfica se extendió a través de las impresiones sobre papel donde se embebían las sales fotosensibles en las fibras del soporte. Más tarde, se incorporaron aglutinantes como la albúmina, el colodión y la gelatina con el fin de sustentar las partículas de plata, protegerlas y lograr un mayor brillo y contraste en la imagen final (Reilly, 1980).

Desde los inicios de la fotografía, el proceso de revelado se basaba en la técnica de impresión o ennegrecimiento directo (*Printing Out Paper*, POP) donde la imagen se formaba únicamente por la acción de la luz sin utilizar ningún revelador químico. Tanto los papeles salados, la cianotipia o la copia al platino, como los procesos con aglutinante como la albúmina, el colodión y la gelatina, se imprimían mediante este proceso. A finales del siglo XIX se introdujeron en el mercado los papeles de revelado químico o impresiones DOP (*Developing Out Prints*) que utilizaban como aglutinante la gelatina. Las sales de plata en estos papeles eran altamente sensibles y la imagen quedaba latente hasta someterse a un baño con revelador que dejaba ver la imagen (Stulik y Kaplan, 2013a).

Comprender las técnicas de impresión es importante para conocer las diferencias físicas y químicas de los papeles fotográficos, ya que la estructura interna es muy compleja y dificulta establecer correctamente las condiciones de conservación, exhibición o tratamiento (Stulik y Kaplan, 2013b).

La heterogeneidad de los procesos y la falta de especialistas en la conservación de estos materiales nos lleva a reconocer la necesidad de mejorar el conocimiento científico sobre el comportamiento de soportes, aglutinantes, partículas fotosensibles y recubrimientos.

Hasta ahora, se han desarrollado mínimamente los métodos de caracterización enfocados a la fotografía histórica y esto conduce a la implementación de criterios diseñados específicamente para el patrimonio sobre papel que resultan en muchos casos inapropiados. Por tanto, se debe extender la preocupación por la preservación de los miles de artefactos audiovisuales que se resguardan e intervienen como meros archivos documentales sin atender a su particular naturaleza.

En la actualidad, instituciones encargadas de la investigación fotográfica han implementado algunas técnicas dirigidas a la identificación de materiales orgánicos e inorgánicos como la espectroscopía infrarroja o la fluorescencia de rayos X. A pesar de que son herramientas muy útiles para determinar algunos de los materiales presentes, todavía es necesario confirmar algunos resultados mediante otros exámenes que profundicen en el estudio de sus propiedades y así poder configurar una hipótesis acertada.

Siguiendo este objetivo se ha trabajado en la valoración de la microscopía de fuerza atómica (AFM) como herramienta de caracterización aplicada a muestras originales producidas entre 1880 y 1930. Esta técnica se ha utilizado en las últimas décadas de forma habitual en diversos campos científicos con el propósito de estudiar estructuras físico-químicas a través de mediciones micrométricas y nanométricas. La aplicación en el área de los bienes culturales es todavía escasa y son pocas las investigaciones que han experimentado con ella. Su empleo se ha centrado principalmente en evaluar las superficies después de la aplicación de un tratamiento de restauración, como un proceso de limpieza química (Pereira *et al.*, 2013; Doménech *et al.*, 2013) o para conocer las principales características de algunos materiales empleados en nuestro campo (Doménech *et al.*, 2006). En el caso de la identificación de procesos fotográficos, no se conocen investigaciones enfocadas a su uso como método de caracterización, sino que se ha empleado como herramienta complementaria a otras técnicas analíticas para la evaluación de procesos de restauración (Ioanid *et al.*, 2011).

La principal ventaja de AFM es ser una herramienta no invasiva que puede emplearse en el campo de la conservación y restauración no solo en estudios experimentales, sino pudiendo efectuar mediciones *in situ* en objetos originales sin necesidad de tomar muestra. Este método presenta limitaciones en cuanto a las acotaciones de las áreas de la superficie que se alcanzan a medir, pero en nuestro caso se ha comprobado que no influye en los resultados obtenidos, ya que los barridos en diferentes áreas no muestran diferencias en la caracterización topográfica y las imágenes obtenidas son representativas de la superficie fotográfica. Estos resultados de AFM constituyen un primer acercamiento y permiten comprender mejor la morfología de los aglutinantes utilizados para la emulsión fotográfica con el propósito de minimizar el juicio basado en asignaciones empíricas que conduzcan a atribuciones erróneas.

Características de los principales aglutinantes

El primer aglutinante incorporado a las copias sobre papel fue la albúmina, introducida por Louis-Désiré Blanquart-Evrard en 1850 (Lavédrine *et al.*, 2009). Se basa en una mezcla proteínica de clara de huevo desnaturalizada que contiene cloruro de plata para su exposición y posterior revelado (Reilly, 1980; Vitale y Messier, 1994).

Su principal característica es el acelerado amarilleamiento de la emulsión. Con el fin de compensarlo se introdujeron en el soporte colorantes rosas y azules, y en la mayoría de los

casos las superficies se viraban con oro o platino buscando proteger la imagen del desvanecimiento (Lavedrine *et al.*, 2009; Reilly, 1986; Reilly, 1980).

Una de sus propiedades es su baja higroscopicidad, la cual provoca craqueladuras en la superficie en condiciones inadecuadas de humedad relativa. Los cambios mecánicos que se originan en el soporte de papel crean tensiones en el estrato de la emulsión ocasionando fisuras y grietas, fácilmente visibles bajo magnificación (Reilly, 1986).

Más tarde se introdujo el colodión, que ya había sido utilizado como aglutinante en negativos sobre placa de vidrio. Está compuesto de nitrato de celulosa disuelto en alcohol y éter y se aplicaba sobre un estrato intermedio de sulfato de bario y gelatina (Fuentes de Cía, 2012). Este estrato, denominado «capa de barita» (o papeles baritados), supuso un cambio en la composición estratigráfica de los positivos fotográficos proporcionando mayor estabilidad, aumentando el contraste de las imágenes y actuando como aislante entre el papel y la emulsión (Lavedrine, 1991; Reilly, 1986).

El colodión presenta una escasa o nula absorción de agua, por lo que no sufre cambios dimensionales. A diferencia de la albúmina, la capa de barita recubre las fibras del soporte, por lo que no son perceptibles bajo microscopio. Otra de sus cualidades es su alta sensibilidad al deterioro físico por abrasión, por lo que es fácil distinguir arañazos o desgaste por fricción en su superficie (Lavedrine, 1991).

A partir de 1890 se comercializaron unos papeles al colodión mate que buscaban complacer la demanda de superficies menos brillantes y más económicas que las copias al platino. Para ello se incorporaron materiales como el almidón de arroz que, además, conseguían una tonalidad más suave (Penichon, 1999).

Contemporáneamente aparecieron las impresiones a la gelatina que, junto a las de colodión, fueron los dos procesos de positivado más utilizados desde 1880 hasta 1910 (Penichon, 1999). Al igual que el colodión, la gelatina fue utilizada como aglutinante en los negativos de vidrio, y en los positivos se aplicó también sobre la capa de barita para proteger la emulsión de las impurezas del papel.

Durante los primeros años la gelatina se empleaba sobre papeles POP. Sin embargo, la aparición de los papeles de revelado al gelatino-bromuro (DOP) supuso su éxito absoluto debido a la variedad de características superficiales que ofrecen estos soportes fotográficos. Esto llevó a que los procesos de ennegrecimiento directo quedaran en desuso.

La principal ventaja de las gelatinas DOP es la alta sensibilidad que le otorga la morfología de la plata filamentaria. Estas partículas de plata presentan un volumen cien veces mayor que las de impresiones POP, lo que la hace más tolerante ante agresiones y deterioros físicos (Fuentes de Cía, 2012).

La naturaleza de las partículas de plata en papeles de revelado hacen a este proceso mucho más estable que los obtenidos mediante procesos de impresión directa. Sin embargo, el aglutinante de gelatina tiene como principal característica su alta higroscopicidad, lo que en ambientes con elevados niveles de humedad relativa se hincha y deteriora las partículas fotosensibles generando *espejo de plata*. Este efecto de apariencia azul e irisada se produce sobre las zonas oscuras de la imagen, ya que presentan mayor cantidad de plata. El uso excesivo de fijador o su insuficiente eliminación durante el enjuague, hace que la humedad absorbida por la gelatina interactúe con los residuos de tiosulfato del fijador y provoca en numerosos casos procesos de sulfuración y óxido-reducción (Lavedrine *et al.*, 2009).

A pesar de que los tres aglutinantes poseen propiedades y características propias, su reconocimiento se vuelve intrincado sin una base sólida de caracterización técnica. Con el fin de contribuir a la búsqueda de una herramienta de medición idónea que permita identificar procesos de una forma eficiente y sencilla, se utilizaron muestras originales pertenecientes a un acervo fotográfico histórico que presentaran las cualidades apropiadas para los requerimientos de este estudio.

El acervo fotográfico del maestro Julián Carrillo

Las muestras escogidas para esta investigación forman parte de uno de los acervos culturales más importantes de México y fue conformado por el maestro Julián Carrillo (1875, Ahualulco, San Luis Potosí, México-1965, Ciudad de México, México) a lo largo de su vida, resguardado por el Centro Cultural Julián Carrillo en el estado de San Luis Potosí, México. El maestro se dedicó paralelamente a la música y a la ciencia, y se desarrolló como extraordinario violinista, compositor y director. En el ámbito científico transformó las bases musicales mediante la revolución del Sonido 13¹.

Carrillo conjugó múltiples hazañas a través de los años y del mundo hasta conformar un importante legado material e inmaterial. Además de desarrollar un sistema musical inédito, conformó a su alrededor todos los elementos para potenciarlo: desde composiciones orquestales hasta instrumentos *metamorfosados*. También reunió gran cantidad de notas manuscritas con valiosos datos técnicos que en la actualidad facilitan la interpretación de su entorno cultural y reconocen los hechos inscritos a un contexto espacio-temporal específico.

Su colección fotográfica, cuidadosamente confeccionada, se conforma por ejemplares de múltiples lugares del mundo en distintas temporalidades, por lo que supuso no solo un medio para ilustrar los acontecimientos de su historia, sino también una importante muestra del desarrollo social y tecnológico de la fotografía (figura 1).

Ha servido, por tanto, como evidencia de la evolución de este medio en las décadas de mayor producción e industrialización de los procesos fotográficos, suponiendo una ventaja en cuanto a la representatividad del material y un inconveniente ante las múltiples hipótesis formuladas. Con todo, el estudio técnico de estos artefactos supone una importante contribución a la valorización del acervo, ya que la preservación del patrimonio documental se basa en una correcta identificación, haciendo que en un futuro estos artefactos pasen a formar parte de la memoria colectiva, a trascender como registro de la evolución de un pensamiento, de los descubrimientos y logros de la sociedad y transformándose en un legado responsabilidad de la comunidad mundial. Del mismo modo, este estudio facilitará la preservación, acceso, identificación e interpretación de los artefactos fotográficos del acervo a través de su reestructuración y relación con los diferentes objetos que lo conforman, permitiendo abordar estos vínculos como un conjunto. Como resultado del análisis encontramos cuatro fotografías identificadas como gelatinas, dos como colodiones y cuatro como albúminas, enriqueciendo la información del acervo fotográfico.

¹ Estructura musical propuesta por el maestro Julián Carrillo basada en escritura numérica que permite clasificar el sistema microtonal o microintervalico desde los tercios de tono hasta los dieciseisavos. El mismo maestro inventó instrumentos musicales y compuso grandes obras que permitían reproducir estos sonidos (<http://www.sonido13.com>).



Figura 1. Composición de imágenes del acervo del maestro Julián Carrillo: a) Media orquesta del Conservatorio Nacional de Música (1 de junio de 1884 a las 11:30 de la mañana). Firmada por Antonio Rulfo-Viola; b) Maestro Julián Carrillo en México en 1907; c) Maestro Julián Carrillo en Bruselas, septiembre de 1903; d) Julián Carrillo en París, 4 de septiembre de 1899; e) Dedicada a Lupe Medina. Leipzig, 8 de abril de 1900.

Estudios analíticos

Se escogieron un total de diez muestras para este estudio. Los criterios para su elección se originaron con base en la datación, lugar de producción, estado de conservación y características físicas. Se buscaba obtener muestras representativas que proporcionaran referencias suficientes para una valiosa caracterización mediante AFM y que a su vez permitieran su identificación de manera precisa.

El microscopio de fuerza atómica de la marca Nanosurf utilizado para este estudio es portátil y su cabezal es movable, lo que permite poder colocarlo directamente sobre la superficie a analizar, sin afectarla ni cortar muestra para su análisis. La técnica de medición utilizada

fue de contacto y las imágenes de escaneo se obtuvieron por medio del software EasyScan Nanosurf®. A través de una muestra de silicio se realizó la calibración correspondiente que asegura un correcto rango de profundidad (Z), fuerza, ángulo de barrido y tiempo. Se midieron cuatro puntos diferentes sobre la fotografía, con el fin de estandarizar los resultados obtenidos en cada una de ellas. Se obtuvieron barridos en áreas de 70 µm × 70 µm, 20 µm × 20 µm y 5 µm × 5 µm (aproximadamente) con el fin de identificar y describir mejor la superficie.

Una vez adquiridas las imágenes, fueron procesadas mediante el software SPIP® que permite obtener información cualitativa y cuantitativa de agregados, poros, rugosidad, imágenes 3-D, etc. Todas las imágenes fueron modificadas mediante los recursos de «corrección de plano» (*Plane Correction-Speed Optimized*) y «suavizado gaussiano» (*Smoothing-GAUSS SD1*) que proporcionan una mejor comprensión e interpretación².

Para la obtención de datos relativos a la rugosidad superficial se tomaron los parámetros en media aritmética o valores absolutos, *Sa*, donde se calcula el valor promedio de todos los valores de Z en positivo ($Sa = 1/n \sum_{i=1}^n |y_i|$).

La medición con espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es un método eficaz para la identificación principalmente de compuestos orgánicos. Su amplio uso en el campo de la ciencia demuestra su versatilidad en la aplicación en investigaciones científicas de todas las ramas; el uso de microespectroscopía infrarroja (micro-FTIR) permite el análisis directo en el objeto sin la necesidad de obtener una muestra, una ventaja invaluable para el área de los bienes culturales. Para este estudio se utilizó un micro-FTIR con espectrómetro Bruker Vertex 70 y microscopio Hyperion Bruker acoplado (imágenes de 200 µm). Los espectros de infrarrojo se obtuvieron por el método de reflectancia con una resolución de 2 cm⁻¹, realizándose un total de 32 escaneos en un rango espectral de 7000-300 cm⁻¹. Se midió en tres puntos de cada muestra fotográfica: en una zona de sombras, grises y área clara.

Resultados y discusión

A partir de los resultados obtenidos de las mediciones en AFM podemos, basándonos en sus características morfológicas, distinguir dos tipologías de aglutinantes, como se muestra en la figura 2: las compuestas por agregados esféricos dispuestos de forma homogénea en la superficie fotográfica (tipo A) y las que muestran superficies planas con formaciones rectilíneas en disposición paralela y perpendicular entre sí (tipo B). Las primeras se asocian con la emulsión de gelatina y las de tipo B con albúmina y colodión, diferencias que podemos constatar en áreas de 70 × 70 µm². Las imágenes obtenidas en AFM permiten también obtener los planos representados en tres dimensiones al igual que su perfilometría³ ayudándonos a reconocer la homogeneidad de la superficie. En la figura 2 el perfil mostrado corresponde a la línea punteada sobre la imagen en 2D.

Se ha descartado la posibilidad de contar con procesos fotográficos que prescindan de aglutinante como papeles salados o copias al platino, ya que no se encontraron superficies que sugirieran formaciones asociadas a la morfología de la celulosa (figura 3).

² Antes de proceder al filtrado de las imágenes se comprobó que no afectarían a los resultados cuantitativos obtenidos como los valores de rugosidad o la medición de partículas, comparando las mediciones antes y después de corrección de plano y suavizado gaussiano.

³ La perfilometría es una línea representativa de la topografía de la muestra en un punto específico de la superficie. Nos ayuda a distinguir la morfología de las superficies entre materiales de distinta naturaleza físico-química.

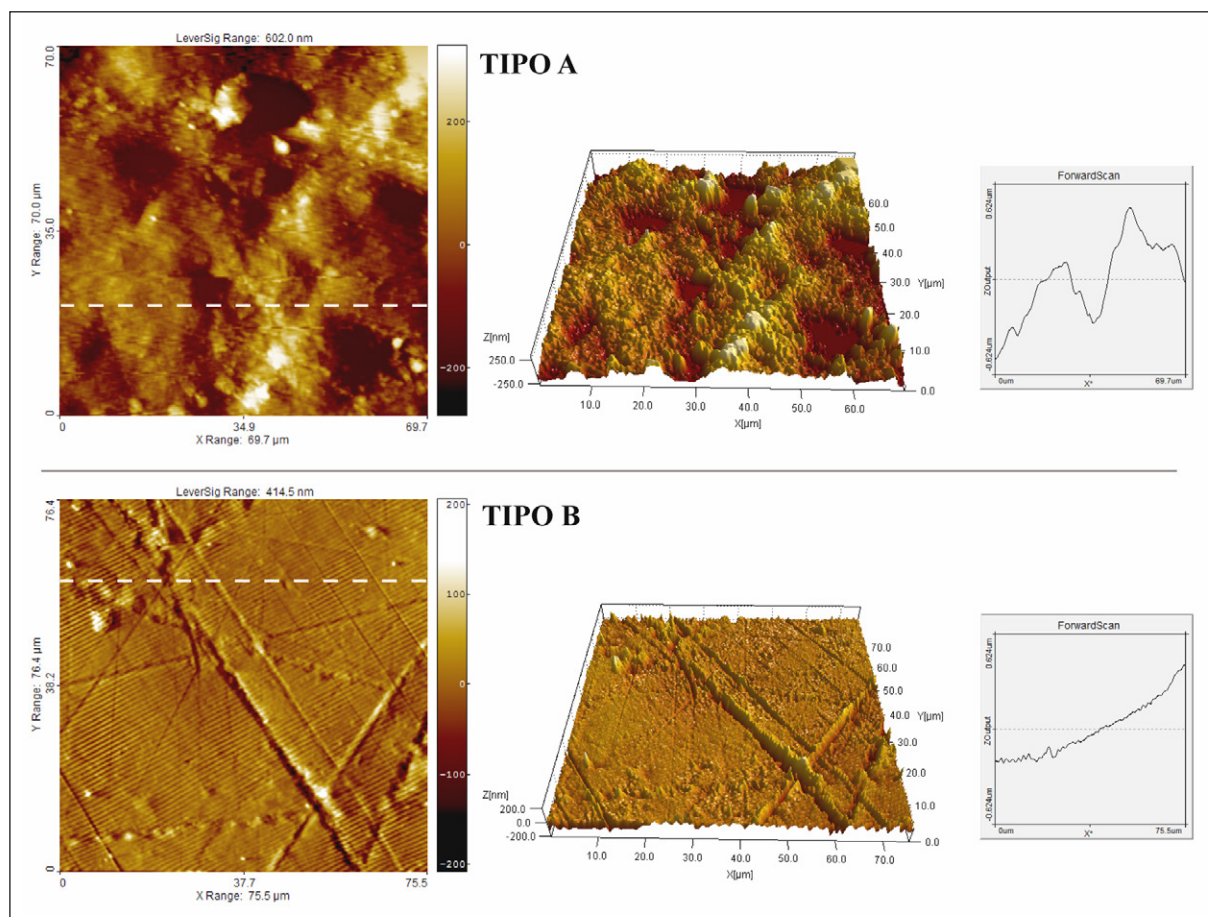


Figura 2. Imagen de AFM, en 3D y perfilometría. Arriba, muestra del tipo A identificada como gelatina, y abajo, una muestra del tipo B identificada como albúmina.

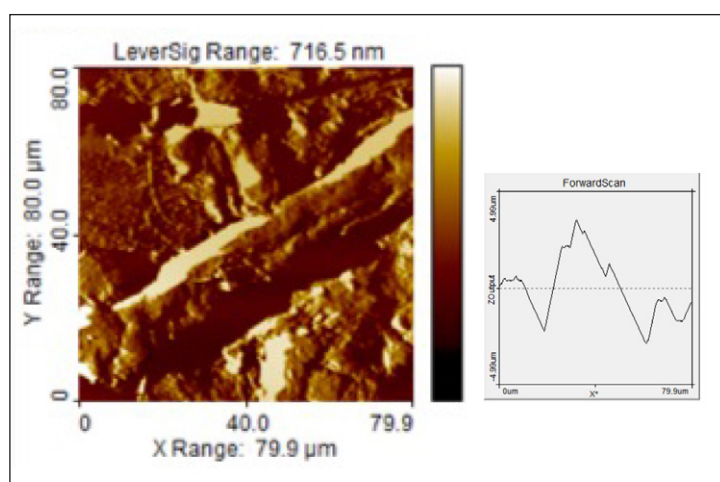


Figura 3. Reverso de la fotografía (celulosa). Imagen AFM y perfilometría.

Los conjuntos esféricos relacionados con la gelatina (tipo A) muestran superficies con una rugosidad que oscila entre 85 y 95 μm y presentan numerosos aglomerados de diferente tamaño repartidos en toda el área, donde encontramos cúmulos de entre 12 y 18 μm de diámetro, a diferencia de las de tipo B, los cuales miden entre 5 y 8 μm . Estas configuraciones se asocian a las características formativas y de ordenamiento del aglutinante. Además de encontrar una clara diferenciación entre superficies, se han observado también distinciones dentro de la misma tipo-

logía. En la figura 4, se muestran imágenes de AFM para dos muestras correspondientes al tipo A que presentan el mismo rango de valores de rugosidad, lo cual nos permite asegurar que tenemos el mismo aglutinante. Observamos que las formaciones que presenta la muestra de la figura 4b son mucho más suaves, creciendo el tamaño de los cúmulos donde la topografía sugiere agregados esféricos homogéneos. Si la comparamos con la muestra de la figura 4a (tipo A), tanto en 2D como en 3D apreciamos la uniformidad de las concentraciones, pero denota como si la superficie de la figura 4b poseyera una envoltura sobre el aglutinante o los agregados, por algún motivo, no alcanzarán a encontrar la superficie. Este fenómeno se puede atribuir a la presencia de un recubrimiento que interfiere en la morfología de la superficie o al tamaño de los agregados de plata envueltos por el aglutinante asociado al proceso de revelado.

En las imágenes de AFM presentadas en la figura 5, en áreas de $70\text{ }\mu\text{m} \times 70\text{ }\mu\text{m}$, $20\text{ }\mu\text{m} \times 20\text{ }\mu\text{m}$ y $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ de las muestras identificadas como tipo A, las formaciones esféricas se revelan como relieves y agregados consecutivos y unidos que van componiendo el material, presentando una morfología alargada para los cúmulos ordenados en una misma dirección. Las hipótesis infundadas antes de la medición en AFM sobre algunas muestras identificadas como gelatina coinciden con la interpretación de las características topográficas obtenidas. Si atendemos a la propiedad higroscópica de la gelatina, observamos en su morfología que en los agregados esféricos se percibe esa capacidad de absorber agua, ya sea durante su hidratación en procesos de formación del aglutinante o al hincharse ante la humedad presente en el ambiente.

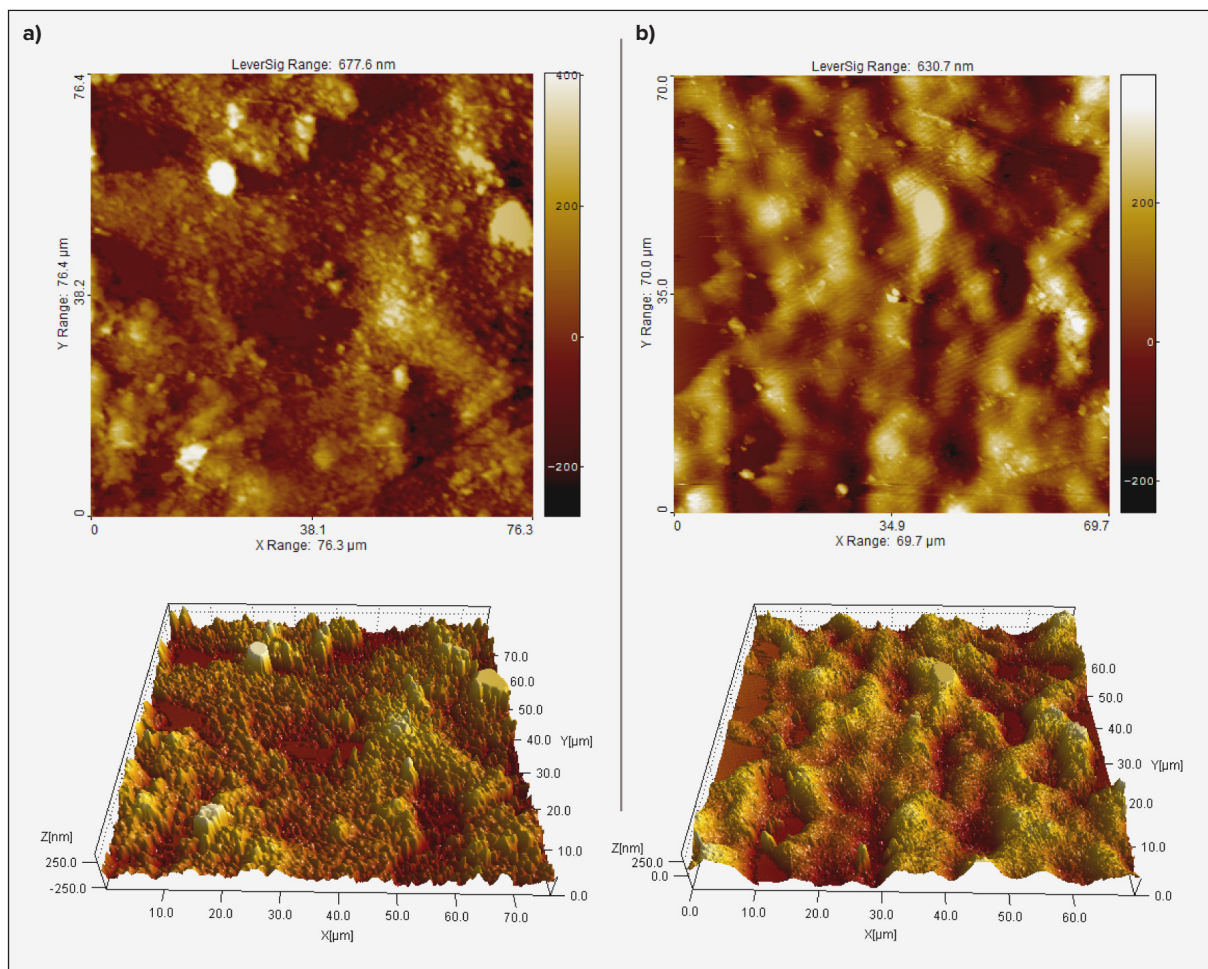


Figura 4. AFM de dos muestras del tipo A. Abajo, sus imágenes en 3D correspondientes. Todas en $70\text{ }\mu\text{m} \times 70\text{ }\mu\text{m}$.

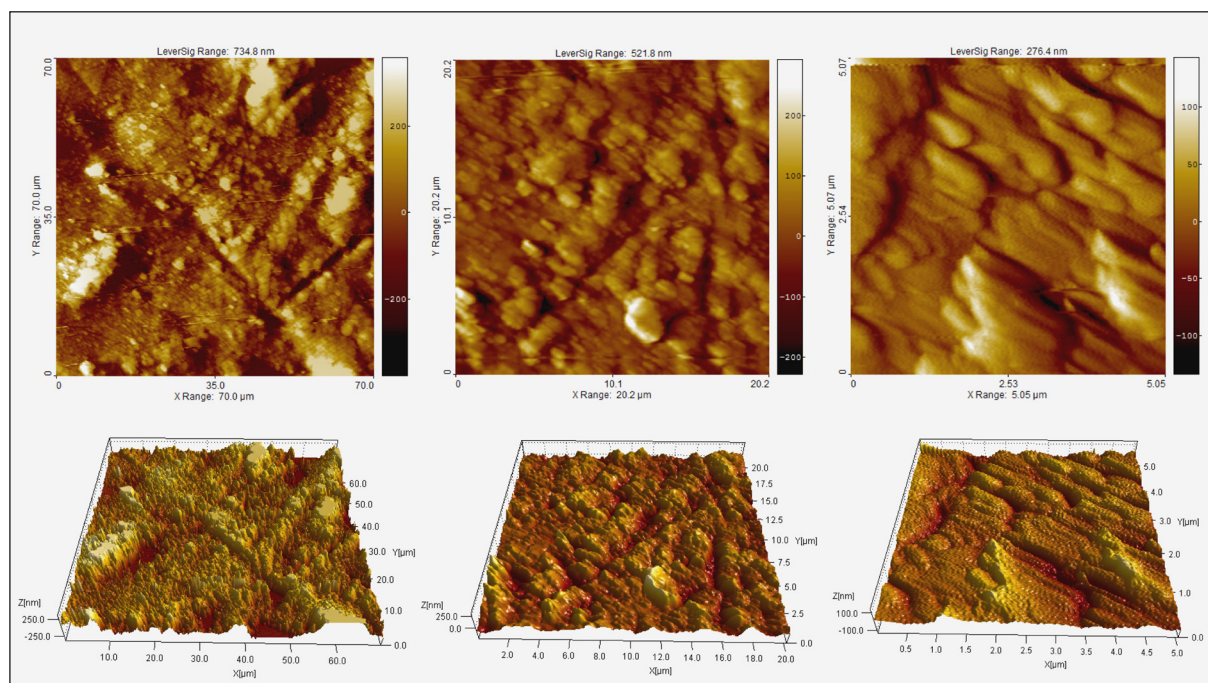


Figura 5. Superficies tipo A en 70 µm x 70 µm (izquierda), 20 µm x 20 µm (centro) y 5 µm x 5 µm (derecha). Abajo, sus imágenes en 3D correspondientes.

Para el caso de las muestras identificadas como de tipo B, imágenes de AFM mostradas en la figura 6, podemos notar áreas casi planas que revelan rugosidades muy características y sobre todo distintivas respecto a las de tipo A, que podemos respaldar comparando los valores de rugosidad, que en este caso oscilan entre 24 y 40 µm. En las áreas de medición de 70 µm x 70 µm encontramos extensiones lisas con relieves muy pequeños formando en su mayoría surcos rectos. Estas estrías muestran cúmulos o relieves en todo su perfil formando rebabas de poca altura; apreciamos que las formaciones rectilíneas en algunas muestras aparecen de manera periódica y dispuestas paralela y perpendicularmente entre sí, formando una especie de red. Estos accidentes presentan cavidades pronunciadas y continuas que sugieren un comportamiento del material conformado bajo tensiones durante su formación, aunque la variedad de factores que alteran la estructura física y química de los materiales fotográficos hacen realmente complicadas las atribuciones fenomenológicas. Conjuntando los conocimientos necesarios sobre elaboración de procesos, características físico-químicas de los principales materiales y formas de deterioro, podemos suponer ciertos aspectos que nos permiten distinguir entre procesos a la albúmina o al colodión.

Por tanto, dentro de las muestras de tipo B distinguimos entre impresiones a la albúmina y al colodión. Las albúminas se han asociado con la presencia de finos surcos que se entrecruzan con forma de rayado. En este caso se ha considerado que este comportamiento se relaciona con las tensiones que se crean en el aglutinante respecto a los cambios físicos que sufren las fibras celulósicas del soporte de papel ante valores elevados de humedad relativa (HR). La baja higroscopicidad de la albúmina viene condicionada probablemente por los procesos de coagulación y endurecimiento que se aplicaban durante el emulsionado del papel con el fin de suceder varias capas entre sí sin que la última deshiciera la primera, así como por los baños de plata para su sensibilización que la volvían insoluble (Reilly, 1980; Reilly, 1986). Esto provoca que la albúmina no sufra cambios dimensionales ante una alteración de los valores de HR y que la rigidez del aglutinante genere la contracción del material.

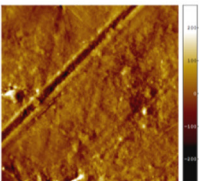
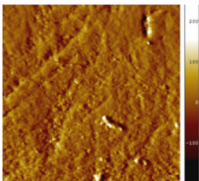
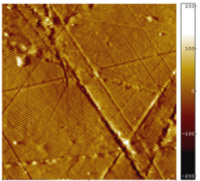
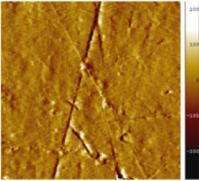
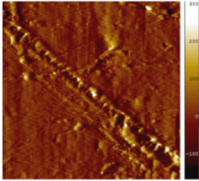
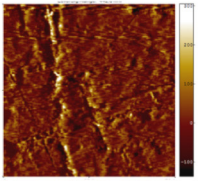
	RUGOSIDAD EN μm	IMAGEN DE LA MUESTRA	RUGOSIDAD EN μm	IMAGEN DE LA MUESTRA	RUGOSIDAD EN μm	IMAGEN DE LA MUESTRA
IDENTIFICADAS COMO ALBÚMINA	28.383		22.592		22.985	
IDENTIFICADAS COMO COLODIÓN	21.118		31.249		41.691	

Figura 6. Tabla comparativa de rugosidades en muestras de tipo B en áreas de $70\ \mu\text{m} \times 70\ \mu\text{m}$. Manteniendo los valores de rugosidad, se distinguen dos procesos fotográficos: albúmina y colodión.

Atendiendo a los valores de rugosidad superficial encontramos asociada a la misma tipología B, a las impresiones al colodión. Éstas muestran características similares a las albúminas, extensiones muy lisas con hendiduras rectilíneas perfectamente conformadas. En algunos casos las particularidades de cada tipología son difíciles de discernir, pero si atendemos, por ejemplo, a la anchura de las líneas, observamos diferencias importantes. En las superficies de colodión se observan estas líneas considerablemente más anchas y más suaves que las atribuidas a la albúmina, además de que casi ninguna de esas fisuras presenta rebordes que sobresalgan por las orillas que contengan cúmulos de plata con aglutinante, como se puede observar en las figuras 6 y 7.

Con el fin de corroborar, o al menos sufragar, los resultados obtenidos en AFM, se complementó la metodología de estudio con mediciones de micro-FTIR y elipsometría de IR, siempre atendiendo al principio de respeto máximo por el original y, por tanto, escogiendo herramientas apropiadas no destructivas.

Se realizaron mediciones de micro-FTIR en puntos específicos y de múltiples características (luces altas, tono medio y sombras) con el fin de reconocer el aglutinante presente. Uno de los inconvenientes de esta herramienta como método de identificación de las emulsiones, es que la albúmina y la gelatina son materiales proteicos de estructuras casi idénticas. Esto supone que la interpretación de los espectros está sujeta, por un lado, a una minuciosa investigación previa y, a la posibilidad de encontrar recubrimientos u otros materiales orgánicos como la celulosa presentes en la impresión fotográfica que se superpongan y obstaculicen la evidencia de alguno de los dos aglutinantes (Casoli y Fornaciari, 2014). Por tanto, la herramienta de AFM nos ofrece una importante ventaja en la diferenciación en la estructura topográfica de estos dos materiales y refuerza la interpretación a la hora de discernir el proceso.

En el caso del colodión, resulta más sencillo identificarlo a través de FTIR debido a una mayor diferencia estructural con respecto a los materiales proteicos. En la figura 8 observamos en el espectro de una muestra identificada como colodión las señales con mayor intensidad en 1681 , 1297 , 889 y $760\ \text{cm}^{-1}$. Al no aparecer picos en las áreas del espectro donde se presentan los materiales proteicos (amidas), resulta sencilla la confirmación de la presencia de nitrato de celulosa (Cattaneo *et al.*, 2007; Perrón, 1989). Por otro lado, en el mismo espectro se han identificado

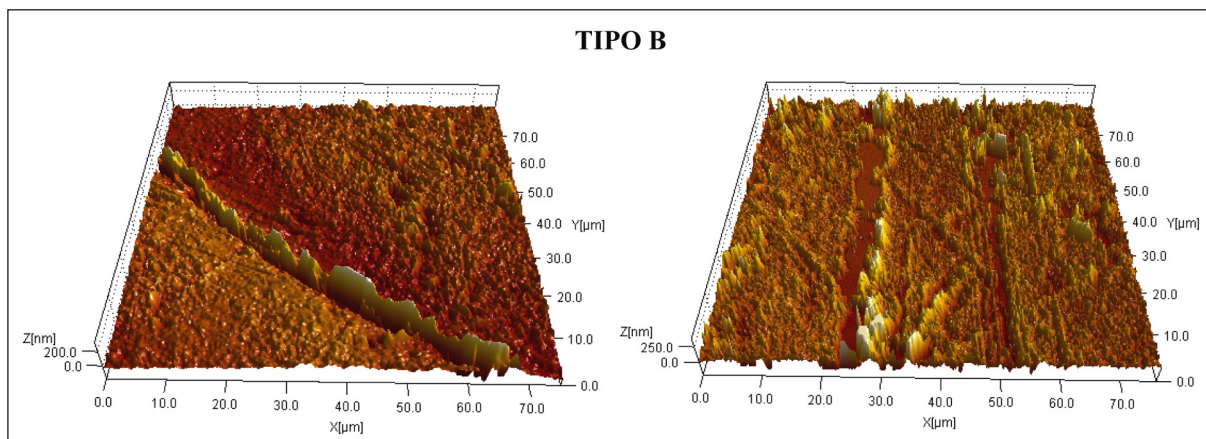


Figura 7. Diferencias entre muestras de tipo B. AFM en 3D identificada como albúmina (izquierda) e identificada como colodión (derecha) en 70 μm x 70 μm .

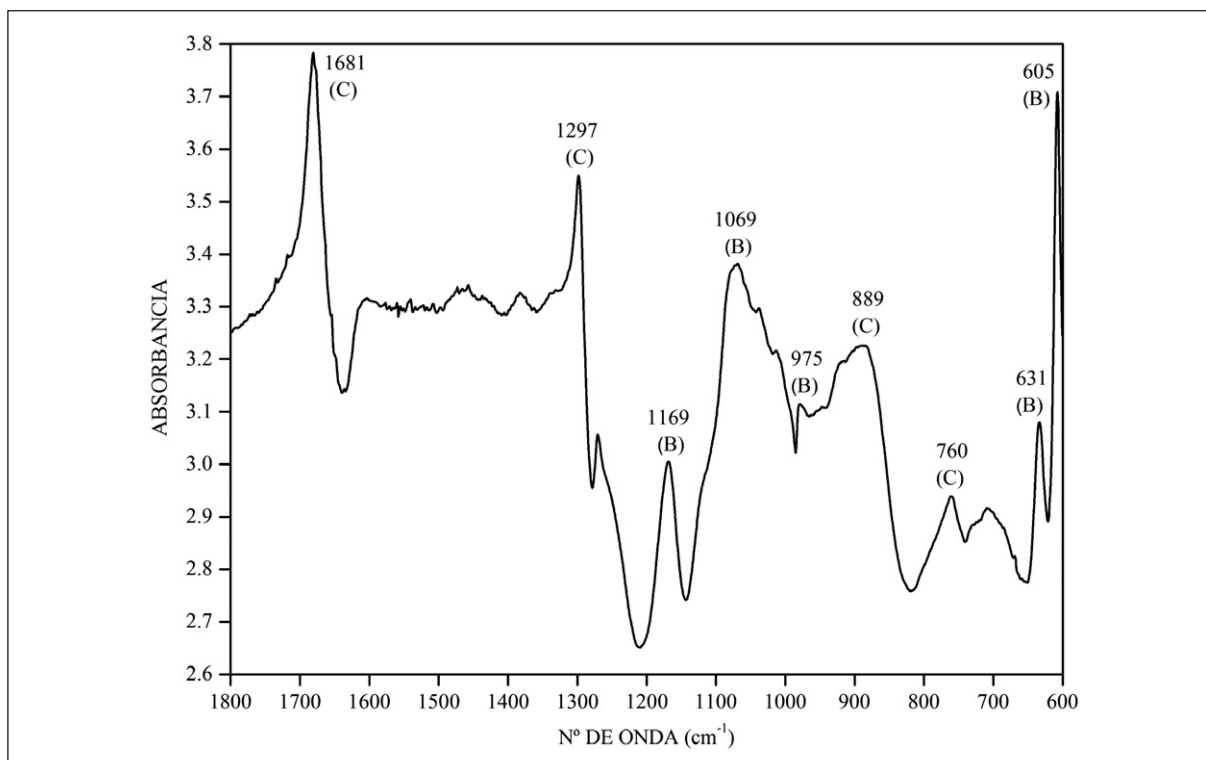


Figura 8. Espectro de micro-FTIR sobre una muestra identificada como colodión. Se observan los picos en bandas del nitrato de celulosa (C) y del sulfato de bario (B).

algunos picos que corresponden al sulfato de bario (capa de barita) en 1169, 1069, 975 cm^{-1} y los más evidentes en 631 y 605 cm^{-1} (IRUG; Ramaswamy, Vimalathithan y Ponnusamy, 2010; Sifontes *et al.*, 2015). Este dato resulta especialmente relevante para diferenciar procesos asociados a estructuras de tres capas (impresiones al colodión y a la gelatina).

Respecto a los materiales con base proteica, la bibliografía propone basarse en la intensidad de las amidas para distinguir entre albúmina y gelatina en FTIR (Christensen, s. f.). Los materiales proteicos emiten señal en la banda de las amidas, donde la amida I ocurre alrededor de 1650 cm^{-1} (C=O por vibración de estiramiento) y la amida II cerca de 1550 cm^{-1} (vibraciones C-N

y N-H) que se corresponden a la absorción de los grupos carbonilos. La amida III representada por dos picos en aproximadamente 1450 y 1420 cm^{-1} (C-H vibración por flexión) es donde deberemos poner atención para valorar su intensidad (Derrik, Stulik y Landry, 1999: 97-98; Cattaneo *et al.*, 2007). Cabe mencionar que en esta misma banda de los grupos carbonilos podemos encontrar resinas, ceras y gomas que pueden dificultar su identificación y la de los mismos aglutinantes. Para identificar las gelatinas observaremos si el pico más cercano a amida II es más alto que el siguiente (alrededor de 1420 cm^{-1}), mientras que si ambos presentan la misma intensidad o el de la derecha es mayor, entonces tendremos una albúmina en nuestra fotografía. Se debe señalar que lo más destacado de los análisis en IR elaborados en este estudio es que además de identificar las proteínas a través de los grupos carbonilos, se ha logrado identificar el sulfato de bario correspondiente a la capa de barita. A diferencia de las muestras de albúmina, las que corresponden a gelatina y colodión podemos discriminarlas gracias a las señales del sulfato de bario mostradas en la figura 9. Se ha descartado por ahora la posibilidad de que esté presente en el papel, ya que sería extraño que solo lo encontráramos en los papeles utilizados en colodiones y gelatinas y no en las impresiones a la albúmina. Se buscará en futuros estudios, mediante fluorescencia de rayos X o espectroscopía Raman, descartar rotundamente esta posibilidad.

Las mediciones mediante elipsometría se encuentran en etapa de evaluación y se espera obtener información relativa a los estratos presentes en las impresiones fotográficas. Por ahora ha sido de utilidad para corroborar algunas de las mediciones obtenidas en micro-FTIR.

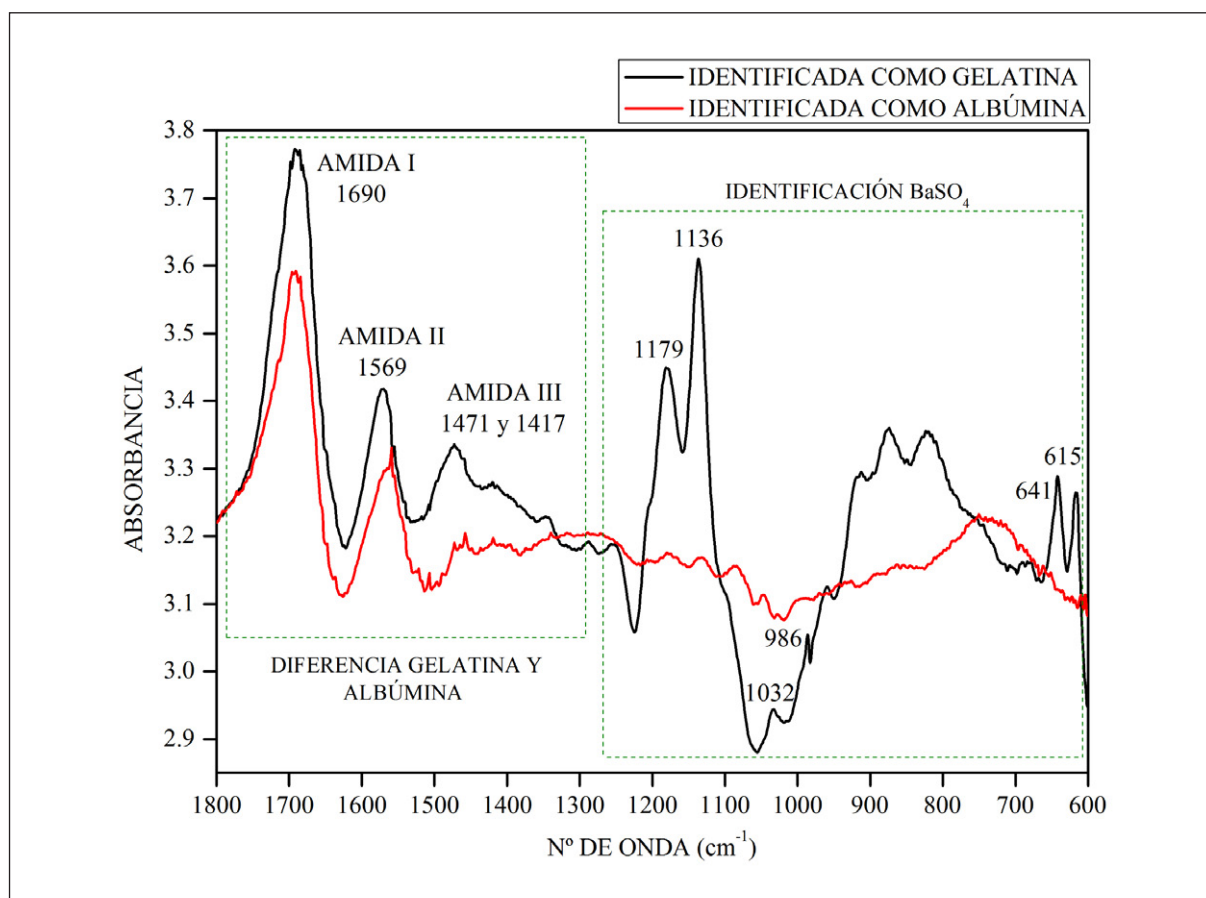


Figura 9. Espectros de micro-FTIR sobre una muestra de albúmina y una de gelatina. Se observa a la izquierda la banda de las amidas que distingue los aglutinantes proteicos. A la derecha, las señales correspondientes a la capa de barita (BaSO_4) en la muestra identificada como gelatina.

Micro-FTIR nos ha permitido desde estudios no destructivos avalar nuestras conclusiones obtenidas de los resultados de AFM sobre los aglutinantes fotográficos. Podemos afirmar que AFM nos permite identificar los diferentes procesos con solo atender a las características topográficas de la superficie. Su aplicación es sencilla y nos proporciona con una sola medición la información necesaria para la caracterización.

Los estudios que se encuentran en curso se centran en distinguir la estructura química de las capas que conforman la estructura total de las imágenes con el fin de consolidar los resultados obtenidos. Para ello se está utilizando espectroscopía Raman, mediante microscopio confocal, que nos permite medir un punto específico calculando la profundidad en la que nos encontramos. Esto nos ayudará a reconocer las diferentes capas y reforzar los resultados obtenidos mediante elipsometría. Una vez establecidos los criterios de diferenciación, se podrá generar una nueva metodología de identificación y mejorar los planteamientos establecidos hasta ahora.

Estas propuestas sin duda están contribuyendo al enriquecimiento del conocimiento sobre el acervo del maestro Julián Carrillo mediante la identificación y, en un futuro próximo, mejorando las condiciones conservativas de la totalidad de la colección.

Conclusiones

Con el fin de evaluar la factibilidad de la técnica AFM como herramienta de caracterización para procesos fotográficos se ha logrado establecer criterios con base en aspectos morfológicos de la superficie, entre ellos la rugosidad de la superficie, que permiten diferenciar el tipo de aglutinante utilizado en el proceso fotográfico; de los resultados obtenidos se distinguen dos tipologías que clasifican dichos procesos, una de las tipologías a la gelatina, y la otra, a la albúmina y al colodión, donde en esta última se están considerando aspectos morfológicos y estructurales para distinguirlas. De esta forma, además de encontrar una clara diferenciación entre superficies se han observado también distinciones dentro de la misma tipología.

Aunque todavía se debe indagar para comprender mejor las propiedades superficiales de los materiales fotográficos, este estudio supone un valioso acercamiento a la potenciación de esta herramienta sobre el patrimonio fotográfico. Una correcta identificación del aglutinante y, por tanto, del proceso fotográfico presente, asegura una mejor conservación de los artefactos fotográficos y evitará la aplicación de métodos restaurativos o preventivos inapropiados.

El modelo del microscopio de fuerza atómica utilizado en esta investigación no necesita toma de muestra, por lo que el uso de técnicas no invasivas resulta un método eficaz para el patrimonio cultural permitiendo su confiable aplicación en un futuro. Además, solo es necesario realizar una única medición sobre la superficie, ya que los barridos en diferentes áreas no muestran diferencias en la caracterización topográfica y las imágenes obtenidas son representativas de la superficie fotográfica.

Se concluye también que, a diferencia de los protocolos de identificación establecidos mediante observación bajo magnificencia (lupa o microscopio) que permiten solo lanzar hipótesis basadas en su construcción estratigráfica (basado en la observación o no de las fibras) y la atribución de deterioros presentes, la información directa de la superficie a nivel micrométrico consigue establecer pautas más seguras sobre los materiales presentes sin interferir, por ejemplo, su estado de conservación. A pesar de que los múltiples materiales presentes pueden sufrir transformaciones físico-químicas en su estructura debido a su degradación intrínseca, se considera que no interfieren en su estructura morfológica.

Las interpretaciones realizadas con AFM han podido ser corroboradas mediante micro-FTIR, mediante estudios previos que se centran en intensidades de absorción correspondientes a amidas III; de nuestros resultados de AFM hemos podido establecer nuevas interpretaciones de resultados de espectroscopía infrarroja que nos permiten discernir los procesos con la identificación de la capa de barita en el espectro.

En la actualidad se busca integrar a esta investigación otros análisis, como espectroscopía Raman, profundizar en los estudios de elipsometría, fotoluminiscencia y UV-Vis. La complementación en la caracterización de las muestras permitirá acercarse al objetivo final, donde se busca poder implementar bajo una sola técnica, en especial AFM, un proceso completo de identificación.

Bibliografía

- CASOLI, A., y FORNACIARI, S. (2014): «An analytical study on an early twentieth-century Italian photographs collection by means of microscopic and spectroscopic techniques». *Microchemical Journal*, 116: 24-30. <http://doi.org/10.1016/j.microc.2014.04.003>
- CATTANEO, B.; CHELAZZI, D.; GIORGI, R.; SERENA, T.; MERLO, C., y BAGLIONI, P. (2008): «Physico-chemical characterization and conservation issues of photographs dated between 1890 and 1910». *Journal of Cultural Heritage*, 9 (3): 277-284. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.004>
- CHRISTENSEN, M. C. (s.f.): FT-IR techniques for studying the composition and degradation of Photographic Materials.
- DERRICK, M. R.; STULIK, D., y LANDRY, J. M. (1999): *Infrared spectroscopy in conservation science*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- DOMÉNECH CARBÓ, M. T.; MÁS BARBERÀ, X.; AURA CASTRO, E., y MARTÍNEZ BAZÁN, M. L. (2006): «Evaluation of morphological changes of aged acrylic, ketone and hydrocarbon resins used in contemporary artworks». *Arché*, (1): 163-166.
- DOMÉNECH CARBÓ, M. T.; SILVA, M. F.; AURA CASTRO, E.; DOMÉNECH CARBÓ, A.; FUSTER LÓPEZ, L.; GIMENO ADELANTADO, J., y YUSÁ MARCO, D. (2013): «Multitechnique Approach to Evaluate Cleaning Treatments for Acrylic and Polyvinyl Acetate Paints». Retrieved from <https://repository.si.edu/handle/10088/20499>.
- FUENTES DE CÍA, Á. M. (2012): *La conservación de archivos fotográficos*. SEDIC. Asociación Española de Documentación e Información Científica, único.
- IOANID, E. G.; IOANID, A.; RUSU, D. E.; POPESCU, C.-M., y STOICA, I. (2011): «Surface changes upon high-frequency plasma treatment of heritage photographs». *Journal of Cultural Heritage*, 12 (4): 399-407. <http://doi.org/10.1016/j.culher.2011.04.002>.
- IRUG BASE DE DATOS [en línea]. Disponible en: <http://irug.org>.
- LAVEDRINE, B. (1991): «The study of the microstructure of silver grains in gelatin printing out paper during accelerated ageing». *Topics in Photographic Preservation. American Institute for Conservation Photographic Materials Group*, 4: 106-123.
- LAVEDRINE, B.; FRIZOT, M.; GANDOLFO, J. P., y MONOD, S. (2009): *Photographs of the Past: Process and Preservation*. (J. P. McElhone, Trans.) (1.^a ed.). Los Ángeles: Getty Conservation Institute.
- PENICHON, S. (1999): «Differences in Image Tonality Produced by Different Toning Protocols for Matte Collodion Photographs». *Journal of the American Institute for Conservation*, 38 (2): 124-143. <http://doi.org/10.1179/019713699806113510>.

- PEREIRA, C.; FERREIRA, I.; BRANCO, L. C.; SANDU, I. C. A., y BUSANI, T. (2013): «Atomic Force Microscopy as a Valuable Tool in an Innovative Multi-scale and Multi-technique Non-invasive Approach to Surface Cleaning Monitoring». *Procedia Chemistry*, 8: 258-268. <http://doi.org/10.1016/j.proche.2013.03.032>.
- PERRON, J. (1989): «The use of FTIR in the study of photographic materials», *Topics in Photographic Preservation*, 3: 112-122.
- RAMASWAMY, V.; VIMALATHITHAN, R. M., y PONNUSAMY, V. (2010): «Synthesis and characterization of BaSO₄ nano particles using micro emulsion technique». *Adv. Appl. Sci. Res*, 1 (3): 197-204.
- REILLY, J. M. (1980): *The Albumen & Salted Paper Book: The history and practice of photographic printing, 1840-1895* (1.^a ed., vol. 1). Rochester, NY: Light Impressions Corporation. Recuperado de: <http://albumen.conservation-us.org/library/monographs/reilly/>
- (1986): *Care and Identification of 19th Century Photographic Prints* (1.^a ed., vol. 1). USA: Eastman Kodak Company.
- SIFONTES, Á. B.; CAÑIZALES, E.; TORO-MENDOZA, J.; ÁVILA, E.; HERNÁNDEZ, P.; DELGADO, B. A.; GUTIÉRREZ, G. B.; DÍAZ, Y., y CRUZ-BARRIOS, E. (2015): «Obtaining Highly Crystalline Barium Sulphate Nanoparticles via Chemical Precipitation and Quenching in Absence of Polymer Stabilizers». *Journal of Nanomaterials*, 2015, 1-8. <http://doi.org/10.1155/2015/510376>.
- STULIK, D., y KAPLAN, A. (2013a): *The Atlas of Analytical Signatures of Photographic Processes*. Getty Conservation Institute.
- (2013b): «The Atlas of Analytical Signatures of Photographic Processes: Its Past, Present, and the Future». En *Topics in photographic preservation* (vol. 15, pp. 249-263). Nueva Zelanda.
- VITALE, T., y MESSIER, P. (1994): «Physical and Mechanical Properties of Albumen Photographs». *Journal of the American Institute for Conservation*, 33 (3): 279-299. <http://doi.org/10.1179/019713694806083014>

MHS, la herramienta de gestión patrimonial

Marian Chiriac

mchiriac@santamarialareal.org

Juan Carlos Prieto Vielba, Jesús Castillo Oli, Begoña García García, Jose Carlos García, Alberto López García, Daniel Basulto García-Risco y Mario Tena Marín

Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico

Resumen: El objetivo principal del proyecto MHS ha sido generar una solución para la gestión integral del patrimonio histórico, que integre los conceptos de conservación preventiva, seguridad, eficiencia energética y uso.

Como objetivos secundarios se han considerado los siguientes:

- Desarrollo de una infraestructura de monitorización.
- Implementación del «conocimiento experto» a través de algoritmos matemáticos.
- Generación de procedimientos y estandarización.

Para conseguir estos objetivos, se ha contado con un equipo multidisciplinar, varias fuentes de financiación y colaboraciones con diversas instituciones.

El resultado final es una plataforma compleja, compuesta por elementos hardware, software, protocolos y procedimientos que, en su conjunto, permite la monitorización de los bienes patrimoniales en todos sus aspectos: adquisición de datos, análisis y recomendaciones.

Esta plataforma ha demostrado ser una herramienta capaz de poner en práctica el concepto de conservación preventiva, siendo probada a lo largo de siete años en más de cuarenta casos reales de gran diversidad.

Palabras clave: MHS, sistema de gestión, conservación preventiva, eficiencia energética, monitorización, patrimonio cultural.

Abstract: The main objective of the MHS project was to generate a solution for the integrated management of heritage, integrating the concepts of preventive conservation, safety, energy efficiency and use.

Secondary objectives were considered the following:

- Development of a monitoring infrastructure.
- Implementation of «expert knowledge» through mathematical algorithms.
- Generation of procedures and standardization.

To achieve these objectives, it has had a multidisciplinary team, several sources of funding and collaborations with various institutions.

The end result is a complex platform composed of hardware and software elements, protocols and procedures, as a whole, allows monitoring of the heritage assets in all its aspects: data acquisition, analysis and recommendations.

This platform has demonstrated to be a tool capable of implement the concept of preventive conservation, being tested over 7 years in more than 40 real cases of great diversity.

Keywords: MHS, management system, preventive conservation, energy efficiency, monitorization, cultural heritage.

1. Antecedentes

Desde el preciso instante de su concepción todos los bienes culturales se encuentran sometidos a un proceso inexorable de deterioro, que irá mermando su capacidad y funcionalidad de forma ineludible. Este proceso, lento y continuo, afecta a todos los aspectos que configuran el valor patrimonial de los bienes culturales, a saber, en palabras del ilustre ingeniero José Antonio Fernández Ordóñez: valor científico, estético, histórico, simbólico y de uso. Son conceptos amplios, en cierto modo difusos, que incluyen la calidad y singularidad técnico-constructiva y artística, el carácter histórico o historiográfico, la monumentalidad, la implantación en el territorio y su encaje en el paisaje, su valor de uso y sus significados cultural, etnográfico, arqueológico, conmemorativo, etc. (Durán, 2011).

Incide en este problema el ingente volumen de bienes culturales existentes, que desbordan la capacidad de gestión de los diferentes actores responsables de su conservación. Resulta pues perentorio cambiar el modelo de actuación clásico y tener la capacidad de adelantarse al deterioro, conociendo la información precisa para evaluar la situación de cada edificio o bien mueble, en todo momento, y hacerlo de manera sostenible, desde un punto de vista económico, ambiental y social. La viabilidad operativa para satisfacer esta necesidad se supe- dita inexorablemente a una automatización del proceso y a la aplicación de nuevas tecnologías.

A lo largo de más de 20 años de actividad en el campo de la conservación y restauración del patrimonio, la Fundación Santa María la Real del Patrimonio Histórico, en adelante FSMRPH, ha detectado esta necesidad y ha desarrollado un sistema que facilite la toma de decisiones enfocadas a la conservación de los bienes culturales, que limite la aleatoriedad que rige en los procesos actuales, y garantice la integridad, el respeto, la objetividad y la jerarquía en las actuaciones. Patente de esto es el proyecto *Monitorización de iglesias románicas* (MIro), iniciado por FSMRPH en el año 2005 (Chiriac *et al.*, 2010), con el cual se han establecido las bases teóricas al sistema anteriormente indicado y abierto el camino a la creación en el año 2009 del proyecto «Monitoring Heritage System», en adelante MHS.

2. Objetivos MHS

Desde su inicio, el objetivo principal del proyecto MHS ha sido generar una solución para la gestión integral del patrimonio histórico, que integre los conceptos de conservación preventiva, seguridad, eficiencia energética y uso.

Como objetivos secundarios se han considerado los siguientes:

- Desarrollo de una infraestructura de monitorización.
- Implementación del «conocimiento experto» a través de algoritmos matemáticos.
- Generación de procedimientos y estandarización.

Para conseguir estos objetivos, se ha contado con un equipo multidisciplinar (arquitectos, ingenieros, informáticos, historiadores, químicos, etc.), varias fuentes de financiación y colaboraciones con diversas instituciones. Entre las instituciones, públicas y privadas, que han participado y/o colaborado en distintas fases del desarrollo del proyecto MHS destacamos:

- Asociación País Románico, a través del programa RuraLab, en las fases iniciales del proyecto (desde el año 2009 hasta 2012).
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, a través del programa de Ayudas a la innovación tecnológica en el medio rural, en las convocatorias de 2011, 2012 y 2013.
- Programa Interreg SUDOE IVB, de la UE, mediante el desarrollo del proyecto Smart Heritage Buildings (SHBuildings), en colaboración con centros tecnológicos y universidades portugueses, franceses y españoles durante los años 2013 y 2014.
- Junta de Castilla y León, a través de los proyectos territoriales Románico Norte y Románico Atlántico, desde el año 2005 hasta ahora.
- Universidades públicas y privadas (Universidad de Valladolid, Universidad de Salamanca, Universidad Politécnica de Madrid, Universidad Europea de Madrid, etc.) que, mediante convenios específicos de colaboración, han permitido integrar el conocimiento teórico en la tecnología orientada hacia el patrimonio.
- Telefónica, a través de la incorporación de MHS en el Programa de Partners Movilforum, desde el año 2015 hasta ahora.
- Otras entidades públicas y privadas.

Gracias a todo este apoyo, la FSMLRPH ha sido capaz de crear una plataforma compleja, elementos hardware, software, protocolos y procedimientos que, en su conjunto, permite la monitorización de los bienes patrimoniales en todos sus aspectos: adquisición de datos, análisis y recomendaciones.

3. Componentes y funcionamiento del sistema

El sistema resultante recoge y almacena los datos referentes al conocimiento declarativo (hechos y situaciones sobre un determinado objeto) y de control (información sobre el seguimiento de una acción), y tiene implementados algoritmos complejos, permitiendo extraer conclusiones y recomendaciones. La base de conocimientos de este sistema, junto con herramientas avanzadas de análisis, le permite imitar el razonamiento humano para resolver distintos problemas. También dispone de actuadores integrados que reciben la información del sistema y actúan en consecuencia, permitiendo controlar la variación de múltiples parámetros de modo automático (Chiriac *et al.*, 2014).

Tal y como se indicaba en Chiriac *et al.* (2013), el sistema MHS se compone tanto de una parte física o hardware que incluye el equipamiento necesario para la medición, recepción, transmisión y almacenamiento de datos, como de aplicaciones informáticas que, principalmente, realizan tareas de interpretación y gestión de la información. De hecho, agrupando todos los componentes MHS, podemos decir que para el funcionamiento normal del sistema MHS se

requiere al menos tres elementos: una infraestructura local, un centro de control y una interfaz de usuario.

La **infraestructura local** se compone principalmente de sensores, detectores y actuadores. El papel principal de esta infraestructura es tanto de recolección y almacenamiento de datos como de gestión de automatismos, según las reglas preconfiguradas por los técnicos MHS a través de algoritmos matemáticos.

Toda esta infraestructura utiliza una plataforma propia, diseñada por y exclusivamente para MHS, plataforma versátil que permite integrar equipamiento y aplicaciones software de terceros. Las ventajas de esta versatilidad es patente en el momento que se requiere analizar parámetros de un amplio aspecto (ambiental, estructural, eficiencia energética, turismo, etc.), ya que en lugar de instalar múltiples infraestructuras con sus correspondientes plataformas, se utiliza una sola que integra a todas las demás, proporcionando al cliente una infraestructura compacta.

Todos los dispositivos diseñados por la FSMLRPH para MHS han sido optimizados desde el punto de vista técnico-económico para adecuarse a las necesidades reales del entorno patrimonial.

Las infraestructuras de todos los edificios monitorizados por MHS están conectadas con el centro de control inteligente a través de comunicaciones de datos tipo internet, SMS y M2M. Con base en el partenariado existente entre la FSMLRPH y Telefónica, el sistema MHS emplea la plataforma Smart M2M Solution, desarrollada por Telefónica, para la conexión, gestión y control de las comunicaciones M2M y SMS a nivel de operador (figura 1).

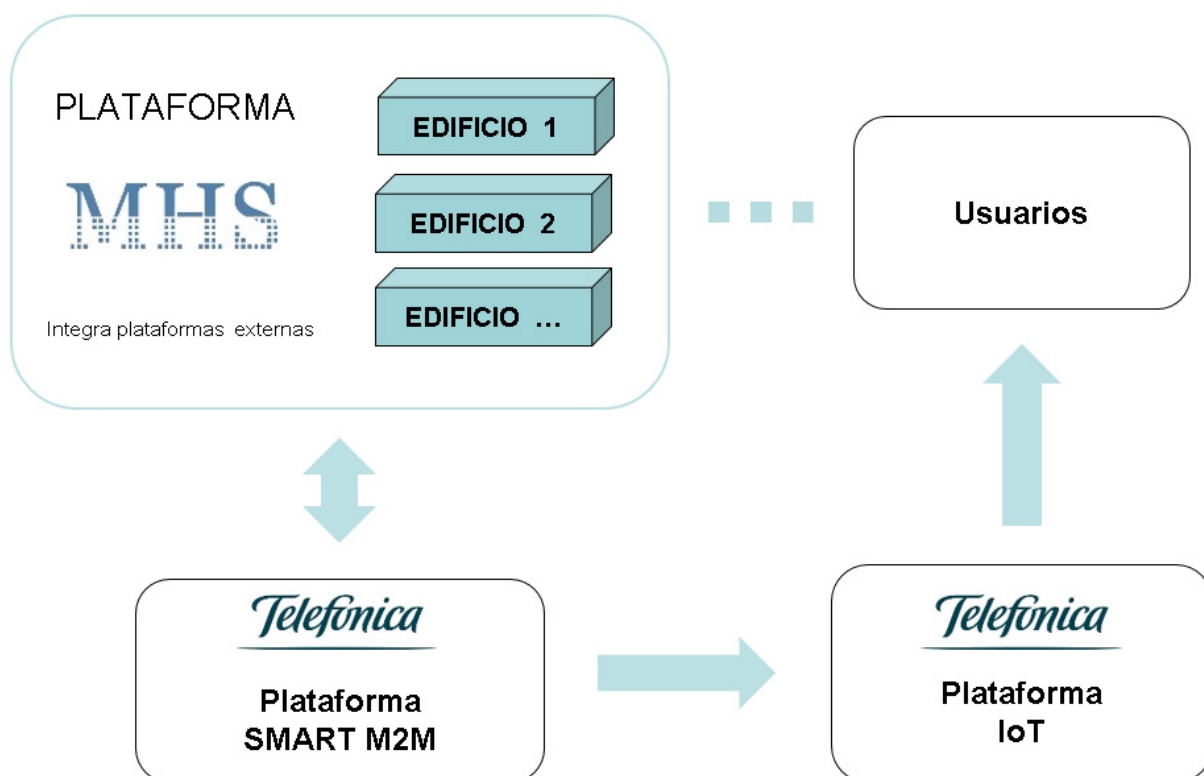


Figura 1. Interconexión de la plataforma MHS con otras plataformas (Prieto, 2015).

El **centro de control** inteligente almacena y procesa toda la información recibida desde los edificios patrimoniales que cuentan con el sistema MHS. Aunque todos los procesos de recepción, almacenamiento y análisis de los datos están automatizados, MHS cuenta con la supervisión de un técnico especialista para toda la información recibida y/o generada en el centro de control.

Desde el punto de vista de la infraestructura del centro de control, MHS cuenta con una serie de servidores propios, configurados como plataforma MHS, y se comunica con la plataforma IoT de Telefónica para el almacenamiento de los históricos de datos.

Las **interfaces de usuario** son aplicaciones software con las cuales se puede acceder a la información reportada por el sistema y configurar distintos parámetros del sistema. Por ejemplo, el acceso a los datos generados y guardados en la BB.DD. puede ser realizado a través del navegador web (www.mhsproject.com) o mediante una aplicación software de escritorio, desarrollada por la FSMLRPH a tal efecto. Ambas interfaces permiten la generación de gráficos a partir de los datos provenientes de una consulta, la exportación de los datos a un formato editable, así como la generación de informes automatizados, cuyo aspecto es configurable y personalizado, y que ofrecen información sobre los análisis de datos realizados y sus recomendaciones.

Para poder actuar y proteger un bien patrimonial se debe conocer su estado y las condiciones óptimas en las que este bien puede perdurar en tiempo. Para esto, la FSMLRPH ha desarrollado un algoritmo específico basado en el conocimiento experto existente sobre el patrimonio, resultados obtenidos a través de ensayos y casos de estudio, parámetros e indicaciones provenientes de las normativas en vigor y, todo ellos, alimentados con datos objetivos obtenidos en tiempo real a través de la monitorización (figura 2).

Los resultados del algoritmo son una serie de avisos y recomendaciones que se le proporciona al cliente para que pueda gestionar de un modo óptimo la conservación de los bienes patrimoniales analizados.

La integración del conocimiento ha sido posible a través de la modelización matemática e integración en distintas aplicaciones software, comprendidas en los tres elementos anteriormente indicados (infraestructura local, centro de control e interfaz de usuario).

De forma resumida, el funcionamiento MHS es muy sencillo: el sistema local contiene una red de sensores inalámbricos que registran los valores de temperatura, humedad, ilumina-

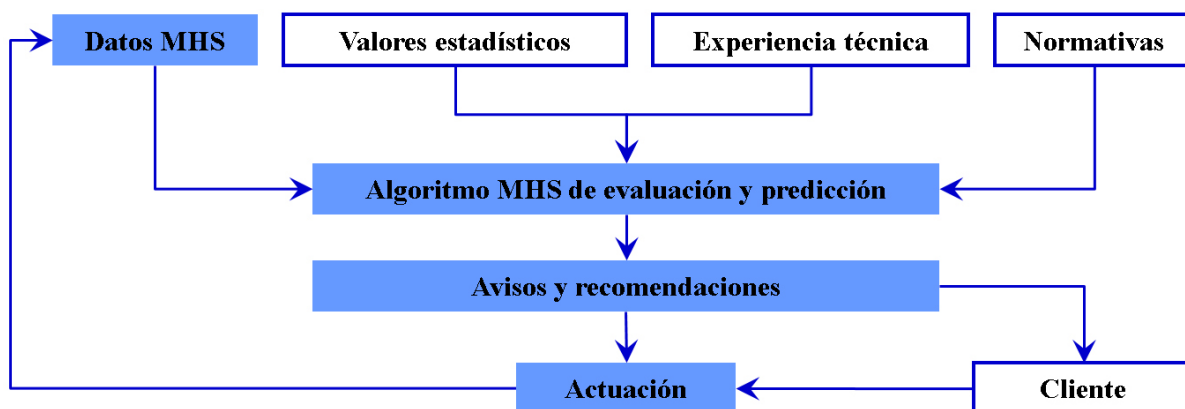


Figura 2. Actuación basada en la interconexión del conocimiento con la monitorización.

ción, presencia, etc., y los envían a un servidor central, donde son analizados de forma continua, detectándose instantáneamente aquellos valores que ponen en peligro la conservación del bien o que no son adecuados para una gestión eficaz. De este modo se pueden tomar medidas correctoras, ya sean de forma automática o manual, en el momento en que son necesarias. Además, los datos están a disposición del usuario mediante aplicaciones software específicas o a través la página web www.mhsproject.com, donde se puede obtener un informe técnico automático siempre que se desee.

Para que todo esto sea posible, la implementación del sistema MHS en los casos patrimoniales se basa en cuatro etapas:

Inspección y propuesta

Esta etapa suele ser conocida como de premonitorización. Se trata de la inspección del caso de estudio desde varios puntos de vista (patologías, elementos constructivos, bienes patrimoniales, mantenimiento, etc.) y siguiendo el método de trabajo contemplado en IPCE (2011).

Según cada caso, se pueden realizar tareas de monitorización *in situ*, de corta duración, con la finalidad de acotar y valorar distintas patologías. Así mismo, con el fin de ajustar los requerimientos del sistema de monitorización, se suelen realizar varios tipos de pruebas: cobertura radio, contenido de sales, conexión eléctrica, etc.

Al finalizar los estudios anteriormente indicados se procede a la redacción de una propuesta de actuación que se remite para su aprobación al cliente.

Instalación del sistema

Una vez recibida la aprobación para la propuesta, se procede a la obtención de los permisos correspondientes, adquisición de material, configuración del equipamiento y, finalmente, instalación del sistema *in situ*.

El sistema se considera instalado solamente en el momento en que se ha comprobado su correcto funcionamiento, generado el informe de instalación y permitido el acceso del cliente a la plataforma MHS.

Análisis y recomendaciones

En el momento de finalizar la instalación del equipamiento *in situ* entra en funcionamiento el análisis de los datos generados por el sistema de monitorización. Dependiendo de la problemática de cada caso, este análisis puede realizarse tanto automatizado, a través de los modelos matemáticos implementados en aplicaciones software, como manual, a través del análisis personalizado de un experto.

Mantenimiento

Al igual que en la anterior etapa, al finalizar la instalación *in situ* se da comienzo a la etapa de mantenimiento. Esta etapa es activa y comprende varias actividades: comprobación de datos, resolución de incidencias, recalibración de sensores, etc.

En la figura 3 se presenta una visualización esquemática de la trazabilidad de estas cuatro etapas. Se puede observar que, una vez instalado el equipamiento *in situ*, tenemos un ciclo compuesto de solamente dos etapas: análisis de datos y mantenimiento.

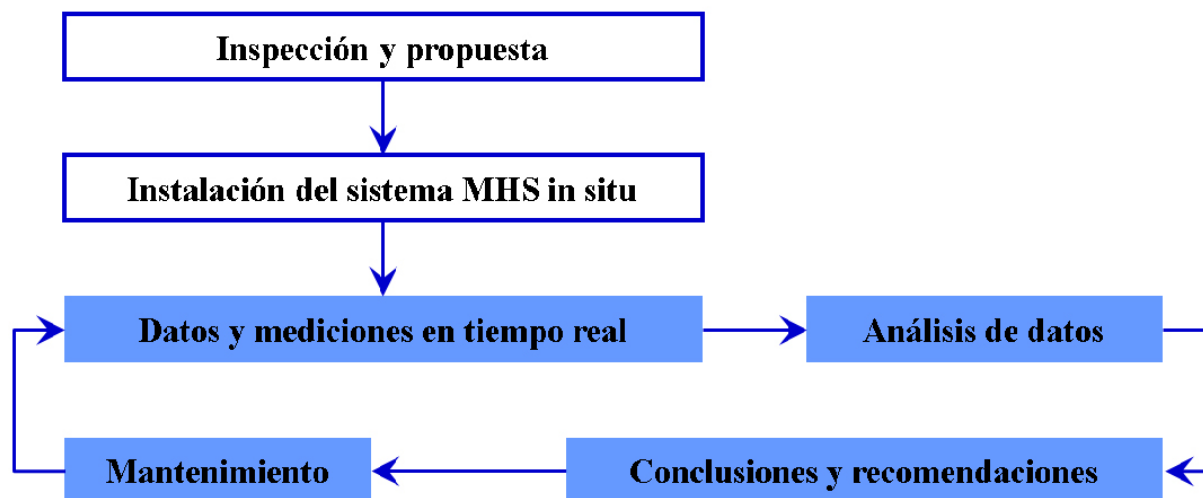


Figura 3. Etapas de la implementación del sistema MHS.

4. MHS como herramienta de gestión integral

El proceso de gestión de la conservación del patrimonio cultural es muy complejo y va desde la indefinición que encontramos para definir de forma precisa y certera su valor patrimonial, hasta delimitar el alcance de las intervenciones necesarias, que actúen de forma respetuosa con el bien y garanticen su integridad. En palabras de John Ruskin: «La restauración es la más completa destrucción que puede sufrir un edificio. Restaurar un monumento es destruirlo para crear falsas copias e imitaciones..., puesto que lo que constituye la vida, el alma de un edificio, jamás se puede restituir; hacen falta los brazos y los ojos de los artistas que lo crearon». No es sino desde la comprensión de las distintas vertientes de este proceso donde podemos apreciar con claridad los beneficios y la necesidad de desarrollar y aplicar políticas de conservación preventiva, que limiten las intervenciones sobre cualquier elemento del patrimonio, y faciliten la optimización de los recursos disponibles. Actuar cuando se debe y donde se debe, atendiendo a criterios técnicos de conservación, valoración y jerarquización.

Antes de poder actuar, se deben conocer cuáles son los actores implicados en la gestión patrimonial y tenerlos en cuenta durante la generación de los planes de gestión o estrategias de conservación. De forma reducida y muy esquemática (figura 4), podemos considerar que la gestión de los bienes patrimoniales, independientemente del nivel de agrupación de estos bienes (edificio, localidad o territorio), se ve influenciada por la actividad de tres grandes categorías de decisión:

- Propietarios: representados por personas físicas o jurídicas, que son responsables directos de la protección del bien y tienen pleno acceso al mismo.
- Organismos competentes: que son, principalmente, las administraciones locales o regionales, encargados de la vigilancia del respeto al patrimonio y su uso, y del estricto cumplimiento de la normativa vigente.
- Otras entidades: que son aquellas entidades físicas o jurídicas que pueden influir en la gestión de los bienes patrimoniales (por ejemplo: las agrupaciones de ciudadanos, las ONG, los sindicatos, etc.) acelerando o parando distintas actividades.

El sistema MHS ha sido desarrollado como herramienta enfocada a la gestión de bienes patrimoniales en todos los niveles (edificio, localidad y territorio), y contempla en su configu-



Figura 4. Interacción entre distintos niveles de gestión y categorías de decisión.

ración el cumplimiento de las dos primeras categorías de decisión (propietarios y organismos competentes).

Además, la base de la herramienta MHS se centra en una estrategia de gestión y desarrollo sostenible, donde se dispone de un ecosistema de innovación apoyado en la tecnología y la información (López *et al.*, 2012). Dado que la FSMLRPH es el fabricante de los componentes hardware y software que componen la herramienta MHS, puede articularla a medida y adaptarla a las necesidades de cada gestor, para facilitar la coordinación administrativa y la aplicación eficiente de los recursos, así como la transparencia en la gestión y la cercanía al ciudadano. Este sistema presta soporte a la toma de decisiones, permitiendo una respuesta rápida y objetiva, y un control económico horizontal para mejorar la rentabilidad de la inversión en conservación, reduciendo costos al normalizar o comprender zonas de actuación común, con similares connotaciones geográficas, climatológicas o constructivas, sustituyendo al modelo convencional e insostenible de intervenciones puntuales *ex post*, mediante el análisis conjunto de los datos almacenados en cada uno de los principales ejes de acción:

Conservación preventiva

Se trata de parámetros ambientales (temperatura, humedad ambiental relativa, humedad relativa de contacto, presión atmosférica, intensidad lumínica, gases, presencia de xilófagos, etc.), medidores estructurales (extensómetros, clinómetros, acelerómetros, cintas de convergencia, etc.) y desarrollo de automatismos (ventilación, humidificación, climatización, etc.) que nos permiten la estabilización o mejora de las condiciones.

Eficiencia energética

El consumo de recursos, principalmente los energéticos, supone el principal gasto económico de un inmueble en uso, y una de las principales fuentes de contaminación. El soporte que proporciona el sistema permite conseguir un uso racional de los recursos, así como la implementación de medidas de ahorro o el uso de fuentes alternativas. Se trata de soluciones decisivas para garantizar la sostenibilidad económica, y el compromiso ambiental y social.

Seguridad

Se trata de aplicación de sistemas de seguridad y protección frente al expolio o la degradación, incendios e inundaciones, especialmente en monumentos o yacimientos más apartados y vulnerables, mediante vigilancia remota, control de presencia, detectores de humo o

identificación individualizada de los bienes muebles mediante registros electrónicos para su detección en caso de expolio.

Gestión de uso

Incluye aspectos como la difusión (aplicaciones para dispositivos móviles, integración con tecnologías audiovisuales, iluminación inteligente, etc.) y la gestión de las visitas (flujo de turistas, control telemático de accesos, pasarelas de pago, gestión de ingresos, etc.).

Este funcionamiento global hace que el sistema MHS sea un sistema holístico, donde el valor del conjunto del sistema supera la suma del valor intrínseco de los sistemas locales. Es decir, frente a enfoques parciales, muy comunes y sobre todo centrados en la búsqueda de la eficiencia energética, MHS desarrolla una gestión multidisciplinar de los bienes culturales, que se concrete en herramientas, metodologías y sistemas que se adapten a las características específicas del Patrimonio, que sean sencillos, económicos y fáciles de utilizar por el gestor del edificio y que atiendan a factores como seguridad, conservación preventiva, consumo energético y gestión de uso.

5. Casos de estudio

Entre los más de 40 casos de éxito donde se ha implementado el sistema MHS, hay varios niveles de gestión dependiendo de las peculiaridades de cada caso. Para ejemplificar, se van a presentar de forma muy resumida dos casos prácticos: la muralla de Ávila y la iglesia del monasterio de Santa María de San Martín de Castañeda.

5.1. Muralla de Ávila

Se trata de la única muralla monitorizada con el sistema MHS. Desconocedores de las causas de manchas en el exterior de los lienzos y preocupados por la conservación de la muralla, el Ayuntamiento de Ávila ha sacado a concurso público la monitorización de cuatro zonas de la muralla que han sido adjudicados a Telefónica y a la FSMLRPH (Chiriac *et al.*, 2016). Al igual que en todos los casos de monitorización, la FSMLRPH ha seguido las cuatro etapas de implementación MHS indicadas anteriormente.

En la fase de **inspección y propuesta** se ha analizado el estado de los lienzos con problemas, se ha buscado documentación al respecto, se han planteado distintas hipótesis y finalmente se ha plasmado una propuesta de monitorización. Tras la aceptación de la propuesta se ha continuado con la inspección de la muralla, realizándose un análisis de sales y una serie de mediciones de temperatura y humedad.

Con base en los resultados de la fase anterior, se ha procedido en la adquisición, configuración e **instalación** del equipamiento. Debido a las peculiaridades de este escenario, la FSMLRPH ha desarrollado varios circuitos electrónicos específicos: uno para la recolección de la información de varios sensores idénticos con la misma placa, un circuito para alimentación y medición con voltaje alterno a un sensor de conductividad específico, un circuito puente RS232-TTL para la integración de una estación meteorológica, una placa para optimizar la integración de un reloj digital y GPRS en el nodo central Linux.

En la fase de **análisis y recomendaciones** se ha contado con aplicaciones software para el cliente y también se han realizado análisis por parte de los expertos. Durante el aná-

lisis se ha hecho evidente el comportamiento de la muralla en cuanto al contenido de agua a varias profundidades y alturas. También se ha detectado la variación sinusoidal del contenido del agua, coincidiendo con la variación estacional.

Con base en el análisis comparativo entre el tipo de adarve y drenaje (figura 5), se ha recomendado tomar medidas de respiración de la muralla a través de los adarves para facilitar la evapotranspiración. Se espera que, con la implementación de estas medidas, se elimine el problema inicial de las manchas de los lienzos.

En la fase de **mantenimiento** se han solucionado problemas de cobertura GPRS, reemplazado sensores, cambiado circuitos integrados y optimizado el software local y de visualización de datos.

5.2. Iglesia del monasterio de Santa María de San Martín de Castañeda

El precario estado de conservación del templo hizo necesaria una actuación de restauración con objeto de estabilizar el templo y mejorar las condiciones ambientales de conservación.

Para realizar estas actuaciones con las máximas garantías y facilitar una lectura completa del estado de la iglesia y una intervención lo más respetuosa y acertada posible, se han seguido las cuatro etapas de implementación MHS y se ha contado con la colaboración de especialistas de la Universidad Politécnica de Madrid.

Durante la etapa de **inspección y propuesta** se han realizado pruebas de sales y tomado medidas de temperatura y humedad relativa para detectar los puntos críticos.

Durante esta etapa se puso de relieve el alto grado de humedad de la cubierta de la sacristía, el ábside central y los absidiolos, así como la falta de ventilación.

Debido a las peculiaridades del escenario, la fase de **instalación** se ha realizado en dos etapas:

- En la primera, se han instalado sensores de temperatura, humedad relativa y fisurómetros en las tres ábsides de la iglesia. Durante esta fase se ha colocado una serie de *dataloggers* en la sacristía y nave central, lo que ha demostrado la necesidad de una ampliación del número de sensores y dado lugar a la segunda fase de instalación.

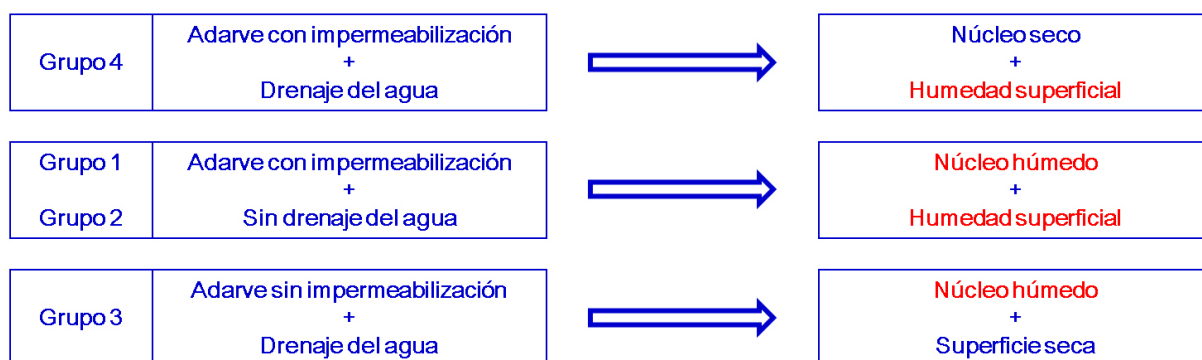


Figura 5. Esquema relacional entre distintos factores de riesgo.

- En la segunda, se han instalado sensores de temperatura y humedad en la sacristía y en la nave lateral, una estación meteorológica en el exterior de la iglesia y motorizado las tres ventanas de la sacristía.

Para la transmisión de los datos de monitorización al servidor central, se ha contado con transmisión de datos a través de SMS en la primera etapa e internet de 1Mb simétrico en la segunda.

Durante la etapa de **análisis y recomendaciones** se han analizado los datos de la monitorización y eficiencia energética.

Dado que la monitorización se ha realizado antes, durante y después de la obra de cambio del tejado, los datos mostraron la evolución de mejora hasta llegar a un comportamiento normal. Asimismo, el sistema de monitorización MHS sirvió para el control y seguimiento de los movimientos de las fisuras presentes en los contrafuertes.

En lo referente a la eficiencia energética, los datos recabados facilitaron la realización de una auditoría energética para el sistema de iluminación y otra para el sistema de calefacción.

En este caso de estudio, la comunicación, gestión y control han sido elementos imprescindibles para asegurar la sostenibilidad del bien y su conservación. La instalación de actuadores para controlar la apertura/cierre de las ventanas de la sacristía de forma automática ha permitido gestionar de forma eficiente el mantenimiento en cuanto a los parámetros de temperatura y humedad, evitando así la reaparición de patologías relacionadas con estos parámetros.

Como aspectos importantes ocurridos durante la fase de **mantenimiento** de este edificio, se pueden mencionar el cambio de cableado para el receptor de internet y la sustitución del sistema de transmisión de los datos de la estación meteorológica.

6. Conclusiones

Gracias al apoyo de múltiples entidades ha sido posible desarrollar y optimizar el sistema MHS hasta convertirse en una herramienta eficiente y sostenible para la gestión del patrimonio.

El enfoque holístico y el alcance del sistema permiten disponer de una herramienta transversal, que va más allá de la monitorización, y desarrolla las posibilidades de la estructura técnica planteada en el sistema MHS como potente, eficaz y completa herramienta de gestión integral del patrimonio cultural. De este modo se dota de conocimiento al sistema de monitorización, permitiendo su desarrollo como un sistema experto, que dispone el conocimiento en la base de sus algoritmos, e interactúa con los usuarios. Más allá de ser un sencillo suministrador de datos, los analiza, ofrece recomendaciones e interactúa con otros elementos para ejecutar acciones sencillas enfocadas a la sostenibilidad económica, social y ambiental.

7. Bibliografía

CHIRIAC, M.; BASULTO GARCÍA-RISCO, D.; RUIZ ENTRECANALES, R., y FORT, R. (2016): «Monitorización de la muralla de Ávila». *Congreso Euro-Americano REHABEND sobre Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio*, Burgos, España.

- CHIRIAC, M.; BASULTO GARCÍA-RISCO, D., y PRIETO VIELBA, J. C. (2014): *Development and Implementation of the MHS Algorithm for the Preventive Conservation of Heritage Monuments*. Second International Congress, Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage, Sevilla, España.
- CHIRIAC, M.; BASULTO GARCÍA-RISCO, D.; LÓPEZ ABEJÓN, E.; PRIETO VIELBA, J. C.; CASTILLO OLI, J., y COLLADO GÓMEZ, A. (2013): *The MHS system as an active tool for the preventive conservation of cultural heritage*. International Congress Science and Technology for the Conservation of Cultural Heritage, Santiago de Compostela, España.
- CHIRIAC, M.; PRIETO VIELBA, J. C., y CASTILLO OLI, J. (2010): *El sistema MHS, un modelo sostenible del Patrimonio*. VII International AR&PA, Valladolid, España.
- DURÁN FUENTES, M. (2011): «Experiencias en la restauración de puentes y caminos históricos». Ingeniería y Territorio. Restauración de la obra pública». *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, Barcelona, España.
- IPCE (2011): *Plan Nacional de Conservación Preventiva, Instituto del Patrimonio Cultural de España*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Madrid, España.
- LÓPEZ ABEJÓN, E.; CHIRIAC, M.; BASULTO GARCÍA-RISCO, D.; PRIETO VIELBA, J. C., y CASTILLO OLI, J. (2012): *Desarrollo e innovación en los sistemas de gestión del patrimonio. MHS (Monitoring Heritage System), sistema de monitorización del patrimonio como herramienta de gestión integral*. VIII International AR&PA, Valladolid, España.
- PRIETO VIELBA, J. C.; CASTILLO OLI, J.; CHIRIAC, M.; BASULTO GARCÍA-RISCO, D., y TENA MARÍN, M. (2015). *El sistema experto MHS para la conservación preventiva del patrimonio cultural*. II Congreso Edificios Inteligentes, Valladolid, España.

Técnicas multivariantes y de realidad aumentada aplicadas a la difusión de arte rupestre

Berta Carrión-Ruiz, Silvia Blanco-Pons y José Luis Lerma

Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE),
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría,
Universitat Politècnica de València. Cº de Vera, s/n. Valencia, España
bercarru@doctor.upv.es

Esther López-Montalvo

UMR 5608 TRACES CNRS, Université de Toulouse 2-Jean Jaurès, 5
allées Antonio Machado, 31058 Toulouse (Francia)

Resumen: La conservación y documentación de arte rupestre prehistórico, así como su difusión, son importantes vías de investigación a desarrollar. En muchos casos, las pinturas rupestres se localizan en lugares de difícil acceso, expuestas a agentes externos que comprometen su conservación. La necesidad de ofrecer una documentación rigurosa, que favorezca a su vez la difusión y la conservación patrimonial de las pinturas levantinas, clasificadas como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, conlleva el desarrollo y aplicación de nuevas tecnologías de análisis y documentación no invasivas.

Teniendo en cuenta estas premisas, en este trabajo se expone un nuevo protocolo de trabajo que comprende, por un lado, la aplicación de la técnica de análisis de componentes principales (ACP) para el estudio y documentación de pinturas rupestres levantinas. A partir de las técnicas de análisis multivariante se persigue diferenciar los distintos pigmentos utilizados, y estos a su vez de la roca soporte, apoyándonos paralelamente en reproducciones experimentales de pigmentos. Por otro lado, con la información relevante extraída del análisis se desarrolla una serie de aplicaciones de realidad aumentada (RA) con fines divulgativos y orientadas a usuarios que utilizan teléfonos inteligentes o tabletas.

Palabras clave: Análisis componentes principales, realidad aumentada, divulgación, *unity*, arte rupestre levantino

Abstract: An important area to explore is conservation, documentation and cultural dissemination of prehistoric rock art. Normally, rock art paintings are located in difficult access sites and the weathering complicate their preservation. The necessity of an accurate documentation that offers dissemination and heritage conservation of Levantine paintings, classified as World Heritage by UNESCO, entail the development and implementation of new and non-invasive analysis and documentation technologies.

Bearing this premises in mind, in this paper a new working protocol is shown. On one hand, the Principal Components Analysis (PCA) is applied to study and document Levantine rock art paintings. The main is, through multivariate analysis techniques, differentiate between pigments and rock and between different pigments. Pigments swatches are used to check the

methodology. On the other hand, three Augmented Reality (AR) applications are developed by means of the most important data provided by PCA, with cultural dissemination purposes for smartphones users.

Keywords: Principal components analysis, augmented reality, cultural dissemination, unity, spanish Levantine rock art.

1. Introducción

Las manifestaciones gráficas de las sociedades prehistóricas constituyen una importante fuente de información, por lo que su documentación, estudio y conservación constituye un compromiso ineludible. Las pinturas rupestres al aire libre, como es el caso del arte levantino, se localizan en abrigos rocosos vulnerables a la erosión del viento, del agua o a la propia acción antrópica (Unesco, 2016). Debido al gran deterioro que suelen presentar, su estudio y documentación debe abordarse a través de técnicas no invasivas que eviten el contacto directo con la superficie decorada. La introducción de la imagen digital ha constituido una auténtica revolución en la documentación del arte prehistórico, tanto como soporte de obtención de calcos como de restitución espacial de los paneles decorados (Domingo y López, 2002; López-Montalvo y Domingo, 2009).

En los últimos años, la aplicación de técnicas de análisis de imagen digital ha puesto de relieve el potencial de estas para ofrecer una visión más completa de los paneles, favoreciendo la visualización de figuras imperceptibles a simple vista, o para mejorar y agilizar su restitución. Numerosos autores emplean técnicas de análisis de imagen para la documentación arqueológica. Una de las técnicas más empleadas es el análisis de componentes principales (ACP) para realzar la pintura y obtener calcos de los motivos representados (Carrión-Ruiz *et al.*, 2016; Vicent *et al.*, 1996; Domingo *et al.*, 2015; Rogerio-Candelera, 2015). Otros autores como Mark y Billo (2006) y Gunn *et al.* (2010) aplican la técnica *Decorrelation Stretch* para realzar las pinturas.

Por otro lado, también es importante divulgar y difundir nuestro patrimonio, de manera que los visitantes de los museos y parques arqueológicos puedan disfrutar de experiencias interactivas a través de medios que dominan y están totalmente integrados en la sociedad, como por ejemplo los teléfonos y las tabletas.

Una de las técnicas de visualización con dispositivos móviles más en auge es la realidad aumentada (RA). Carmigniani *et al.* (2011) detallan el fundamento de la técnica y algunos artículos repasan la aplicabilidad de esta técnica en el ámbito del patrimonio cultural (Casella y Coelho, 2013; Blanco-Pons *et al.*, 2016). Hoy en día esta tecnología se aplica principalmente en el ámbito de los videojuegos (Kim *et al.*, 2014; Kwik y Bahana, 2015), e incluso para la elaboración de material didáctico interactivo (Jamali *et al.*, 2015). Sin embargo, en los últimos

años se están introduciendo de manera progresiva aplicaciones de RA relacionadas con el arte rupestre, como el proyecto «e-ART realidad aumentada y arte rupestre» (Pérez, 2015), y la divulgación cultural del patrimonio arqueológico (Ridel *et al.*, 2014; Haladová *et al.*, 2015; Pierdicca *et al.*, 2015).

Mediante la fusión de las técnicas de análisis multivariante y las técnicas de visualización de RA se consigue enriquecer el estudio, la interpretación y la representación del patrimonio cultural, aprovechando los avances que hoy en día permite la tecnología. Por un lado, mediante ACP se consigue información muy útil para el estudio de las pinturas levantinas. Es posible diferenciar, por ejemplo, entre pigmento y roca soporte, así como entre diferentes tipos de pigmentos. Por otro lado, la aplicación móvil sirve de apoyo para la documentación del bien patrimonial y también como material de divulgación y difusión del patrimonio al público visitante, enriqueciendo su experiencia.

Este artículo tiene por objetivo testar nuevas técnicas de análisis y divulgación del arte rupestre utilizando como caso de estudio las pinturas levantinas de la Cova Remigia (Ares del Maestre, Castelló). A partir de técnicas de análisis multivariante (ACP) se persigue diferenciar los pigmentos del soporte, teniendo en cuenta que uno de los factores condicionantes es el estado de conservación diferencial del panel decorado, con el fin de facilitar, por un lado, la restitución de las figuras y, por otro, su visualización. Paralelamente y con objeto de contrastar la solidez de estas técnicas, hemos confrontado imágenes obtenidas *in situ* con otras correspondientes a pigmentos reproducidos de manera experimental. A partir de la información relevante extraída de la aplicación del ACP se han desarrollado tres aplicaciones para Android basadas en técnicas de visualización de RA, que permiten al usuario recibir información de forma rápida e intuitiva.

El artículo se organiza en seis secciones. En la sección 2 se detallan las técnicas de análisis multivariante. En la sección 3 se detalla la tecnología de visualización de RA. En la sección 4 se presenta la metodología seguida para la realización del análisis multivariante y el desarrollo de las aplicaciones para dispositivos móviles. En la sección 5 se detallan cada una de las aplicaciones desarrolladas. Por último, se finaliza en la sección 6 con las conclusiones extraídas tras la investigación.

2. Análisis multivariante

El análisis multivariante es la parte de la estadística que se encarga de estudiar, analizar e interpretar un conjunto de datos. Pretende reducir los datos de entrada sin pérdida de información, crear grupo de variables, generar reglas para clasificar objetos dentro de grupos bien definidos y métodos para investigar las relaciones de dependencia entre las variables (Peña, 2002).

La técnica de análisis multivariante más conocida y aplicada es el ACP. El objetivo de esta técnica consiste en reducir un conjunto de datos o variables iniciales en un número menor de variables construidas como combinaciones lineales de las originales (Abdi y Williams, 2010). Esta técnica permite, por un lado, identificar posibles variables no observadas y, por otro, transformar las variables originales, normalmente correlacionadas, en nuevas variables no correlacionadas facilitando así la interpretación de los datos (Peña, 2002).

Esta técnica se emplea en teledetección para reducir la información contenida en imágenes satélite multibanda y en análisis multitemporal (Chuvieco, 2010). En el ámbito arqueológico su uso es más reciente y se aplica fundamentalmente en imágenes RGB de pinturas rupestres.

tres para visualizar elementos ocultos o difícilmente visibles y facilitar así la identificación y documentación de motivos (Rogerio, 2011; Rogerio, 2013; Domingo *et al.*, 2015).

3. Técnicas de visualización de RA

Cada día mejoran los dispositivos electrónicos, avanza la tecnología y los usuarios son más partidarios de su uso. Cada vez se hace más imprescindible el uso del teléfono móvil y las miles de aplicaciones disponibles permiten realizar casi cualquier tarea con solo un teléfono. Por ello, hoy en día los dispositivos móviles son una gran herramienta de difusión. Nuevas tecnologías como la RA permiten la difusión e interpretación de cualquier objeto o lugar de interés cultural.

La RA es una tecnología que permite la superposición, en tiempo real, de contenidos virtuales sobre imágenes obtenidas a través de la cámara de un dispositivo. Los contenidos añadidos pueden ser de cualquier tipo, desde una imagen o texto hasta un modelo 3D o vídeo. De esta manera, la información percibida del mundo real se complementa con la información virtual añadida (Fundación Telefónica, 2011).

Esta tecnología se conoce desde 1950 pero realmente no se ha empezado a utilizar hasta hace unos años gracias a los avances actuales. Los primeros sistemas requerían el uso de unas gafas donde proyectar la información, además de un potente ordenador para cargar la información en tiempo real (Carmigniani *et al.*, 2011), lo que provocaba que el sistema fuera poco portable. En la actualidad, estos sistemas se han sustituido por los modernos teléfonos inteligentes, dotados de las herramientas necesarias para la representación de esta nueva realidad. Una cámara de alta resolución, conexión a internet, GPS y un buen procesador son los elementos necesarios para crear una aplicación de RA, y estos están disponibles en cualquier teléfono inteligente.

Hay diferentes formas de añadir los contenidos virtuales en una aplicación de RA (Blanco-Pons, Carrión-Ruiz y Lerma, 2016): una es a través de la posición GPS y orientación del dispositivo. Cuando el dispositivo está localizado en una posición y orientación específica se añade la información virtual y el usuario puede observar los contenidos que hay a su alrededor. Otra forma es mediante el reconocimiento de marcadores (patrones blanco y negro), imágenes u objetos reales. Por medio de algoritmos de reconocimiento de patrones el dispositivo reconoce la imagen y muestra el contenido virtual asociado.

4. Flujo de trabajo

En este punto se expone el flujo de trabajo y las herramientas utilizadas para el análisis e interpretación de pinturas rupestres y su posterior difusión por medio de aplicaciones de RA. Esta metodología, que se puede extrapolar a cualquier otro bien cultural, está dividida en dos fases: la primera trata el análisis de imagen mediante técnicas de ACP, en busca de una mejor interpretación de los pigmentos. En la segunda fase se explica el proceso de desarrollo de las aplicaciones móviles por medio de la tecnología de RA.

4.1. Fase 1. Análisis de las imágenes mediante ACP

La técnica ACP, explicada en la sección 2, se ha aplicado a una imagen de pintura levantina con el fin de, por un lado, observar diferencias entre pigmentos y, por otro, distinguir el pigmento del soporte de manera no invasiva.

Las imágenes empleadas en este trabajo son en color (RGB). Este tipo de imágenes contienen tres canales (R, G, B) muy correlacionados entre sí, es decir, la información que contiene cada uno de los canales está muy relacionada. Mediante ACP es posible obtener tres componentes principales con información separada. Generalmente es en los últimos componentes donde se suele mostrar la información relativa a los pigmentos.

Esta técnica ha sido aplicada a dos imágenes. La primera de las imágenes se corresponde con una reproducción experimental de pigmentos sobre un soporte calizo obtenido en el contexto inmediato de Cova Remigia. La segunda imagen ha sido tomada *in situ* y se corresponde con la representación de un macho cabrío documentado en el abrigo IV de Cova Remigia, en el núcleo artístico de Valltorta-Gasulla (Castellón).

ACP en imagen de simulación de pigmentos

Se ha realizado una reproducción experimental de pigmentos y se han ejecutado distintos trazos con la ayuda de un pincel (figura 1a) siguiendo el protocolo diseñado por López Montalvo y otros (e.p.). Para la reproducción de los pigmentos experimentales se han empleado materias primas –componentes principales, disolventes y aglutinantes– identificados en trabajos de caracterización físico-química de los pigmentos levantinos (Roldán *et al.*, 2007;

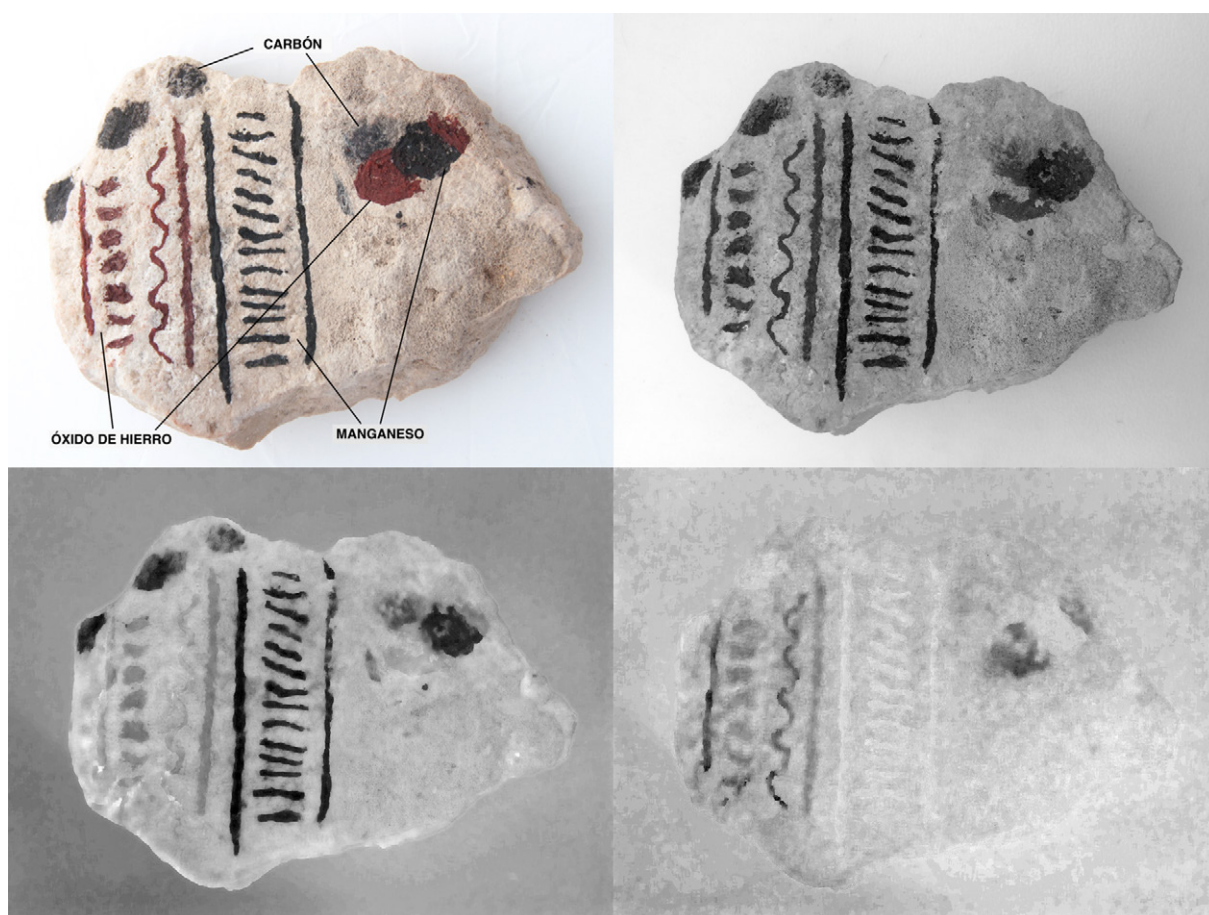


Figura 1. ACP en imagen de simulación de pigmentos: a) imagen RGB de piedra de simulación de pigmentos; b) CP1; c) CP2, y d) CP3.

Roldán *et al.*, 2010; López-Montalvo *et al.*, 2014, etc.). De este modo, hemos reproducido y aplicado sobre la piedra caliza tres tipos de pigmentos:

- Óxido de hierro (hematita) mezclado con agua y grasa animal (pigmento rojo).
- Manganeso mezclado con agua y grasa animal (pigmento negro).
- Carbón vegetal (pigmento negro).

El empleo de pigmentos experimentales, de los cuales conocemos su composición, nos ofrece ciertas ventajas a la hora de interpretar el ACP. En efecto, al conocer de antemano la composición de estos tres pigmentos, podemos llegar a determinar fácilmente si el ACP permite diferenciarlos y, si es posible al mismo tiempo, distinguir cada uno de estos pigmentos del soporte.

De este modo, mientras en el primer componente principal (CP1) no se observan diferencias significativas entre los tres pigmentos, en el segundo componente principal (CP2) obtenido (figura 1c) se produce un realce en negro de los pigmentos de color negro y se atenúan los trazos de color rojo. Por el contrario, en el tercer componente principal (CP3) (figura 1d) se aprecia un realce del pigmento rojizo compuesto por óxido de hierro y una atenuación de los pigmentos de color negro (manganeso y carbón). Es decir, cada color de pigmento se representa en un componente principal distinto, que, si tenemos en cuenta la composición diferencial de los negros, no parece estar en relación con su composición.

Tras el estudio de los componentes principales obtenidos se extraen los elementos que nos interesan de la imagen (figura 2), en este caso las dos clases de pigmento, mediante una binarización de la imagen y una selección manual posterior.

ACP en imagen de Cova Remigia

El motivo analizado se corresponde con un macho cabrío de gran cornamenta (López-Montalvo *et al.*, 2014) representado en el abrigo IV de Cova Remigia. En la imagen tomada *in situ* (figura 3a) se observa que la figura puede estar formada por dos colores diferentes de pigmento, un pigmento rojo intenso realizado con hematita y otro mucho más oscuro cercano al negro, en el que se ha detectado carbón vegetal en sus componentes (López-Montalvo *et al.*, 2014).

Tras aplicar ACP se obtienen tres componentes principales (figura 3). En el CP2 (figura 3c) se observa un realce del pigmento negro haciéndose transparente el pigmento más rojizo. En el CP3 (figura 3d) se realza el pigmento que se corresponde con las zonas rojas del motivo

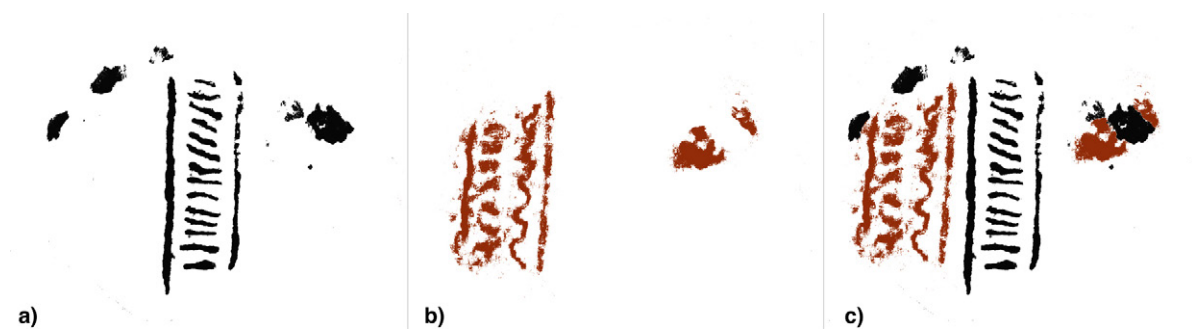


Figura 2. Calcos de los pigmentos extraídos: a) calco de los pigmentos negros; b) calco de los pigmentos rojos, y c) suma de los calcos de ambos pigmentos.

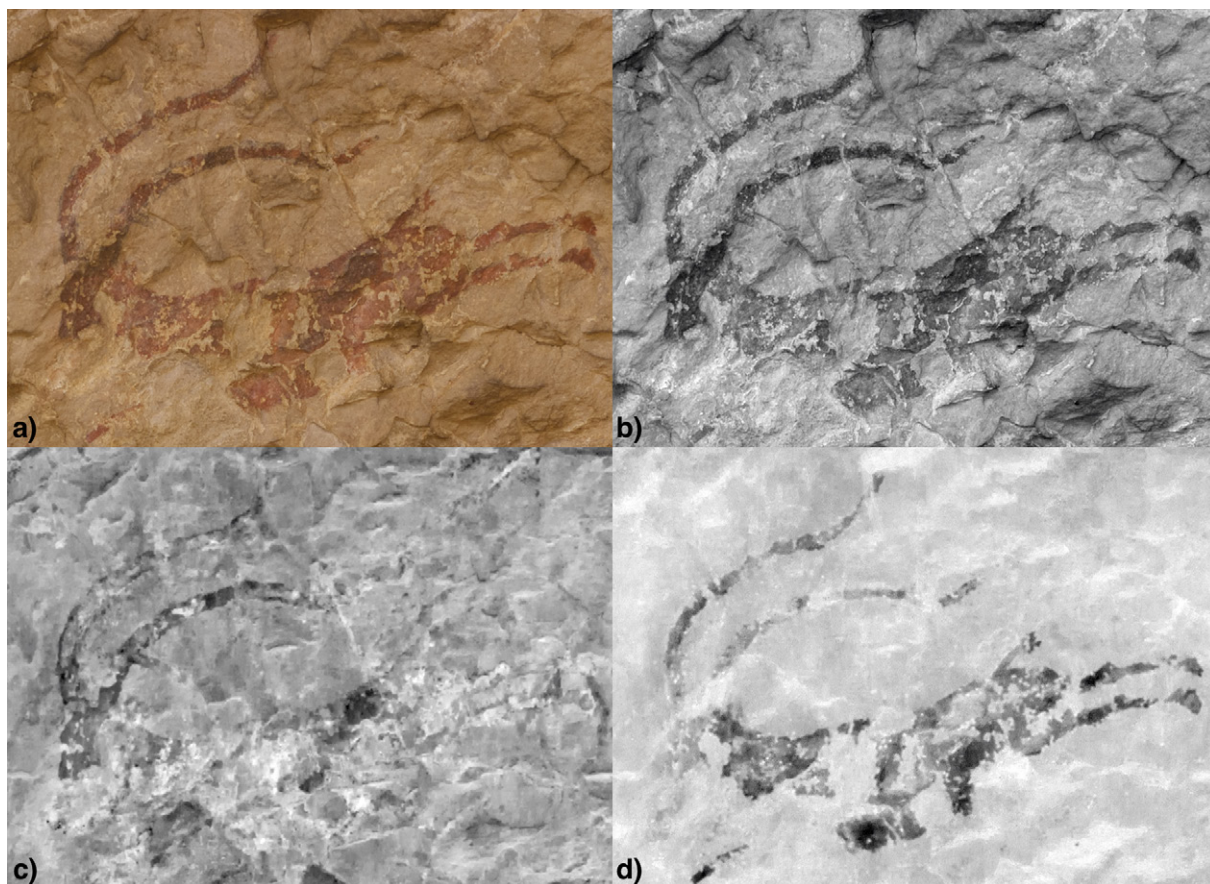


Figura 3. ACP en imagen de Cova Remigia: a) imagen RGB del motivo de la Cova Remigia; b) CP1; c) CP2, y d) CP3.

y desaparecen las zonas de pigmento negro. En suma, se confirman los resultados obtenidos en el ACP de los pigmentos experimentales.

Por tanto, a través del ACP se han podido separar los pigmentos que *a priori* se observan de un color distinto en la imagen tomada *in situ*. De esta forma resulta mucho más fácil la obtención del calco del motivo separado por colores (figuras 4a y 4b). Además, con la suma de los calcos obtenidos en cada uno de los componentes podemos separar la pintura del soporte de manera más rápida (figura 4c).



Figura 4. Calcos de pigmentos extraídos: a) calco del pigmento negro; b) calco del pigmento rojo, y c) suma de los calcos de ambos pigmentos.

4.2. Fase 2. Desarrollo de la aplicación de RA

En la actualidad hay multitud de librerías para el desarrollo de aplicaciones de RA, lo que facilita el desarrollo de nuevas aplicaciones. Una librería es un conjunto de archivos que facilitan la tarea de programación y que contienen diferentes funcionalidades que podemos agregar al programa. En el caso de RA, estas librerías incorporan las herramientas necesarias para reconocer un marcador, una imagen o un texto.

Existen infinidad de librerías de RA, como ARToolkit, DroidAR, Mixare o Vuforia, con funcionalidades diferentes y para distintas plataformas (Blanco-Pons, Carrión-Ruiz y Lerma, 2016). Nosotros hemos decidido emplear la librería Vuforia por distintas razones: incluye un amplio abanico de herramientas de reconocimiento, es muy fácil de usar y, además, ofrece una extensión para Unity.

Unity es un software multiplataforma para el desarrollo de videojuegos que permite realizar proyectos para Android, iPhone, Windows, navegadores web y otros, y ha sido ya utilizado en algunos proyectos de difusión del patrimonio, como, por ejemplo, el desarrollado por Caro y Hansen (2015). Su principal ventaja, además de ser un software multiplataforma, es su facilidad de aprendizaje frente a otros softwares de este tipo.

El protocolo para crear una aplicación de RA es el siguiente:

- Añadir la ARCamera de Vuforia. Es indispensable para cualquier proyecto de RA ya que abre la cámara del dispositivo sobre el que se superpondrán los elementos virtuales.
- Añadir el elemento que activará la aplicación, que puede ser un marcador (FrameMarker), una imagen (ImageTarget) o un texto.
- Añadir el contenido virtual que se visualizará en la cámara del dispositivo. Puede ser un modelo 3D obtenido previamente el cual habrá que importar con su textura, una imagen, un texto explicativo o incluso un vídeo. Estos elementos se deben posicionar en relación al elemento que lo activa, en el centro del FrameMarker o en una zona concreta del ImageTarget. Es importante resaltar que, si lo que se ha de reconocer es una imagen (ImageTarget), esta debe contener un número suficiente de puntos característicos. Este número de puntos característicos los indica la propia librería Vuforia al introducir la imagen.
- Añadir los scripts de programación. Un *script* es un conjunto de instrucciones que realizan una función específica. Esta función puede ser mover un objeto, cambiar el color de una imagen o cualquier acción asociada al pulsar una tecla.
- Cuando la aplicación ya está terminada, el último paso es generar el ejecutable. En este caso, Unity proporciona las herramientas necesarias para construir la aplicación para distintas plataformas.

5. Resultados

Con la información obtenida del análisis multivariante se han desarrollado tres aplicaciones de RA: las dos primeras sobre la fase experimental y la tercera aplicada a un caso real. A continuación se detalla cada una de ellas.

5.1. Visualización de un modelo 3D mediante RA

Esta primera aplicación muestra el modelo 3D del soporte en el que hemos aplicado los pigmentos elaborados experimentalmente. La aplicación se activa al reconocer un marcador. Una vez reconocido, se muestra el modelo 3D del soporte en movimiento, girando sobre sí mismo. Además, se han incorporado unos comandos para controlar la velocidad de giro.

Para esta aplicación se ha obtenido previamente el modelo 3D mediante técnicas fotogramétricas. A partir de múltiples imágenes tomadas desde diferentes ángulos, la técnica SfM (*Structure from Motion*) es capaz de obtener la nube de puntos 3D del objeto en pocos minutos (Michaletti, Chandler y Lane, 2015). Para ello se ha utilizado el software Agisoft Photoscan (Agisoft PhotoScan, 2016) basado en esta técnica y se han tomado múltiples imágenes de las dos caras de la piedra. Los pasos seguidos para obtener el modelo 3D se detallan a continuación:

- Orientación de las fotografías. En primer lugar el software obtiene la posición de las cámaras y la orientación de cada foto y construye la nube de puntos dispersa.
- Generación de la nube de puntos densa de cada lado de la piedra.
- Limpieza de las dos nubes de puntos densas obtenidas.
- Orientación y fusión de las dos nubes de puntos anteriores a partir de puntos homólogos. Se han colocado 14 puntos homólogos en los laterales de la piedra para su fusión y se ha obtenido una única nube de puntos densa de unos tres millones de puntos.
- Generación de la malla de la nube de puntos fusionada. Dado que este modelo es para difusión mediante dispositivos móviles, se ha generado una malla a baja resolución de unas 66 000 caras. Con esto se ha reducido considerablemente el peso del modelo, ya que la malla a alta resolución alcanzaría aproximadamente unas 600 000 caras.
- Obtención de la textura. A partir de las fotografías se obtiene una textura fotorrealística del modelo (figura 5).
- Exportación del modelo. Se puede exportar el modelo a diferentes formatos, entre ellos .obj, .ply y .stl. En este caso, se ha optado por el formato .3ds por varias razones: es un formato muy utilizado en programas de modelado, es totalmente compatible con Unity y, además, es el formato menos pesado (1,6 Mb), permitiendo así una mayor funcionalidad en el teléfono móvil.

Una vez obtenido el modelo, se ha añadido a Unity junto con un FrameMarker de Vuforia. Para dotarlo de funcionalidad se ha creado un *script* que permite que el modelo gire sobre sí mismo, pudiendo aumentar o disminuir la velocidad de giro mediante dos botones (figura 6).



Figura 5. Modelo 3D con textura.

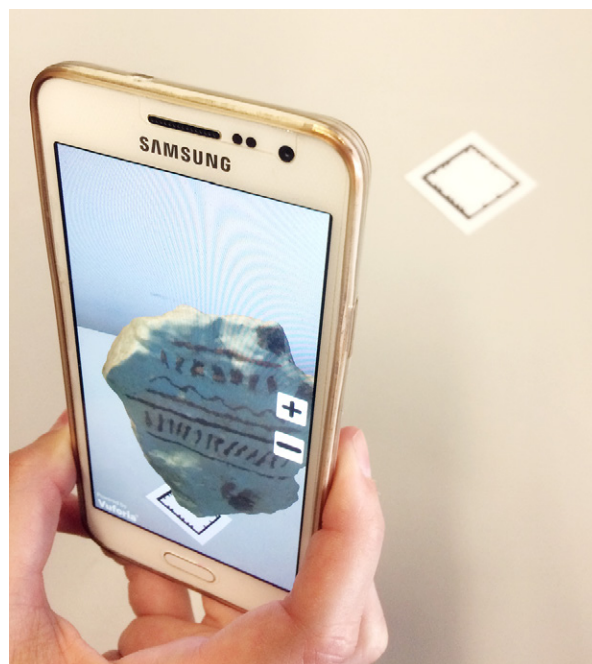


Figura 6. Aplicación de visualización de un modelo 3D mediante RA.

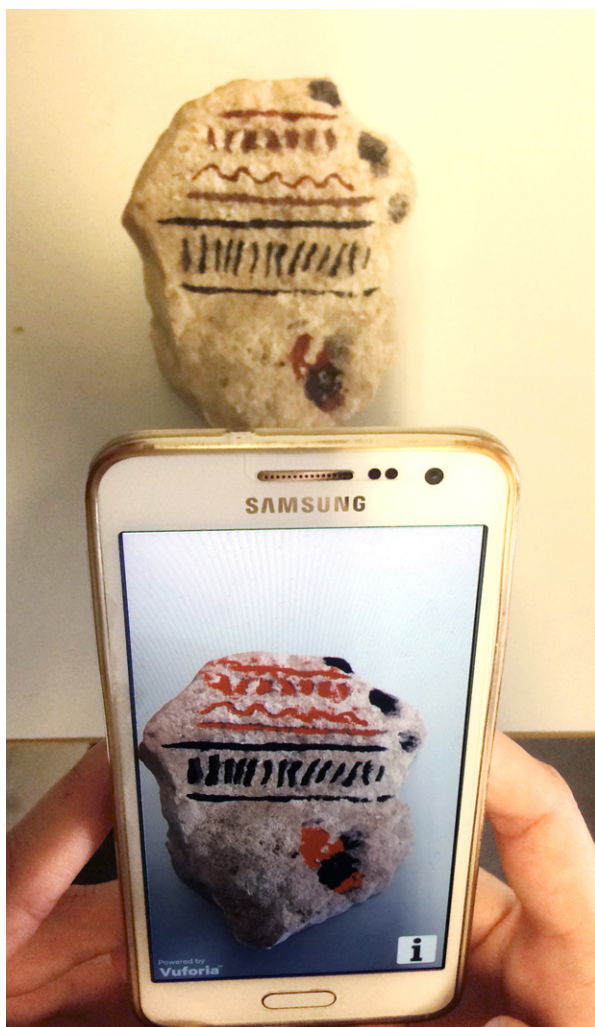


Figura 7. Aplicación de visualización de información relevante sobre simulación de pigmentos.

muestran sobre la composición de los pigmentos es una información que, en un caso real, tan solo conoceríamos de haberse realizado previamente el análisis de caracterización físico-química en el conjunto.

4.3. Aplicación en un caso de estudio. Cova Remigia

La última aplicación es similar a la presentada en el apartado anterior, ya que muestra los calcos de los pigmentos obtenidos a partir del ACP (figura 8). Esta aplicación, sin embargo, está destinada a una mejor comprensión de la figura. Por ello, el botón superior muestra una recreación ideal del estado original de la figura, sin pérdida alguna de materia, para facilitar al usuario la identificación a primera vista (figura 9a). El segundo botón muestra en color negro los pigmentos realzados en el CP2 que se corresponden con las áreas más oscuras de la figura (figura 9b). Al presionar el tercer botón de la aplicación aparece el calco de los pigmentos rojizos de la figura, es decir, los pigmentos realzados en el CP3 del ACP realizado en la sección 4.1 (figura 9c). Por último, el cuarto botón integra los calcos de los pigmentos rojizos y negros de manera que se muestra la figura completa sin la roca soporte (figura 9d).

Este es un ejemplo de aplicación que se podría extrapolar a cualquier objeto de pequeña o mediana escala para su visionado fijo en un museo o en cualquier lugar a través del marcador.

5.2. Visualización de información relevante sobre simulación de pigmentos

La segunda aplicación (figura 7) muestra, al reconocer la piedra de simulación de pigmentos, los pigmentos que hay en la piedra resaltados y diferenciados en dos colores. Los pigmentos resaltados en color negro se corresponden con los pigmentos de manganeso y de carbón vegetal. Por otro lado, los pigmentos compuestos por óxido de hierro se corresponden con los resaltados en color rojo oscuro.

Se ha incluido en la esquina inferior derecha de la pantalla un desplegable que aporta información sobre la composición de los pigmentos que se están visualizando a través de la cámara del dispositivo móvil.

Para esta aplicación ha sido necesario realizar las imágenes de los calcos de pigmento. A partir del ACP de las imágenes se han extraído los calcos de pigmento para posteriormente visualizarlos en la aplicación. Por último, los rótulos que se



Figura 8. Aplicación de motivo de Cova Remigia.

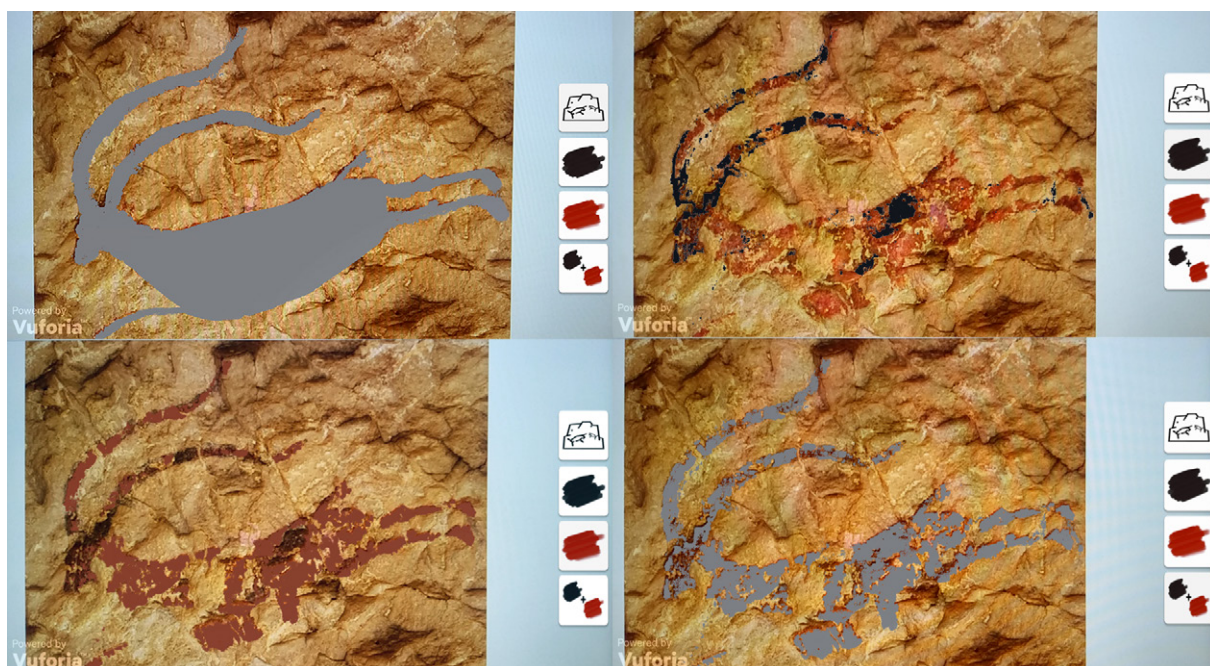


Figura 9. Funcionamiento de la aplicación: *a)* visualización de recreación o reconstrucción ideal de la figura; *b)* visualización del pigmento negro (segundo botón); *c)* visualización del pigmento rojo (tercer botón), y *d)* visualización de ambos pigmentos (cuarto botón).

6. Conclusión

En este proyecto hemos aplicado técnicas de análisis multivariante al estudio de pinturas rupestres levantinas con el objetivo de, por un lado, distinguir el pigmento del soporte y, por otro, diferenciar tipos de pigmentos. En ambos casos, el objetivo último es explorar nuevas técnicas de estudio, documentación, conservación y divulgación del arte rupestre prehistórico.

En relación al estudio y documentación de las pinturas levantinas, se han realizado ACP sobre un caso experimental y otro real. En el primer caso eran conocidos tanto los componentes minerales y orgánicos empleados como el proceso de elaboración; en el segundo, tan solo se han podido identificar, por el momento, los componentes principales, sin llegar a advertir la presencia de disolventes o aglutinantes orgánicos. En ambos casos se ha observado que el ACP aplicado a una imagen de pinturas rupestres permite, en primer lugar, separar información de distintos colores de pigmentos utilizados en una misma figura y, posteriormente, obtener una aproximación al calco de la figura representada a partir de la extracción de esta información de colores con respecto al soporte.

Durante el desarrollo de este proyecto hemos podido comprobar que al aplicar la técnica de ACP es necesario cotejar siempre los componentes principales obtenidos con la imagen original para evitar posibles errores. Esto es debido a que el ACP discrimina los diferentes colores que aparecen en la imagen y, por tanto, desconchados de la roca, líquenes, sombras u otros factores pueden alterar los resultados.

La aplicación del ACP constituye un primer paso que se verá mejorado en el futuro mediante el análisis de otras técnicas de análisis multivariante y la incorporación de imágenes con otras longitudes espectrales, como el ultravioleta o infrarrojo.

Por lo que se refiere a nuestro objetivo de contribuir a la difusión del arte rupestre levantino, hemos desarrollado diferentes aplicaciones de RA que muestran la potencialidad de esta tecnología en el ámbito del patrimonio cultural. La RA permite ofrecer distintos niveles de información al usuario, facilitando en muchos casos la interpretación y comprensión del objeto o lugar visitado a través de la recreación total o parcial del objeto. En nuestro caso concreto de estudio, la RA se muestra extremadamente útil a la hora de facilitar la lectura de figuras parcialmente conservadas. La reconstrucción ideal del estado original de la figura permite orientar al usuario a la vez que toma conciencia del deterioro sufrido por estas pinturas mediante la proyección del calco obtenido a través del ACP.

La tecnología de RA funciona muy bien en el reconocimiento de marcadores e imágenes, pero es más complicado el reconocimiento de objetos reales. Además, la librería Vuforia necesita trabajar con imágenes u objetos que tengan muchos puntos característicos, es decir, imágenes con mucho contraste, diferentes colores y formas. En un futuro sería conveniente el estudio de otras librerías.

7. Bibliografía

- ABDI, H., y WILLIAMS, L. J. (2010): «Principal component analysis». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2 (4): 433-459.
- AGISOFT PHOTOSCAN (2016) [en línea]: Disponible en: <<http://www.agisoft.com/>> [consulta: 15 de octubre de 2016].

- BLANCO-PONS, S.; CARRIÓN-RUIZ, B., y LERMA, J. L. (2016): «Review of augmented reality and virtual reality». En *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation "ARQUEOLÓGICA 2.0"*, pp. 176-183.
- CARMIGNIANI, J.; FURHT, B.; ANISETTI, M.; CERAVOLO, P.; DAMIANI, E., e IVKOVIC, M. (2011): «Augmented reality technologies, systems and applications». *Multimedia Tools and Applications*, 51 (1): 341-377.
- CARO, J. L., y HANSEN, S. (2015): «De la fotogrametría a la difusión del patrimonio arqueológico mediante game engines: Menga un caso de estudio». *Virtual Archaeology Review*, 6 (12).
- CARRIÓN-RUIZ, B.; BLANCO-PONS, S., y LERMA, J. L. (2016): «Digital image analysis of the visible region through simulation of rock art paintings». *Proceedings of the 8th International Congress on Archaeology, Computer Graphics, Cultural Heritage and Innovation "ARQUEOLÓGICA 2.0"*, pp. 169-175.
- CASELLA, G., y COELHO, M. (2013): «Augmented heritage: situating augmented reality mobile apps in cultural heritage communication». *Proceedings of the 2013 International Conference on Information Systems and Design of Communication*, pp. 1-3. Disponible en: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2503883>>
- CHUVIECO, E. (2010): «Análisis digital de imágenes: extracción de información temática». En *Teledetección ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*, pp. 323-480.
- DOMINGO, I.; CARRIÓN, B.; BLANCO, S., y LERMA, J. L. (2015): «Evaluating conventional and advanced visible image enhancement solutions to produce digital tracings at el Carhe rock art shelter». *Digital imaging techniques for the study of prehistoric rock art*, Elsevier, 2 (2-3): 79-88.
- DOMINGO, I., y LÓPEZ, E. (2002): «Metodología: El proceso de obtención de calcos o reproducciones». *La Cova dels Cavalls en el Barranc de la Valltorta*, pp. 75-81.
- FUNDACIÓN TELEFÓNICA Y ARIEL (2011): *Realidad Aumentada: una nueva lente para ver el mundo*. Madrid.
- GUNN, R. G.; OGLEBY, C. L.; LEE, D., y WHEAR, R. L. (2010): «A method to visually rationalise superimposed pigment motifs». *Rock Art Research*, 27 (2): 131-136.
- HALADOVÁ, Z. B.; SZEMZÖ, R.; KOVAČOVSKÝ, T., y ŽIŽKA, J. (2015): «Utilizing Multispectral Scanning and Augmented Reality for Enhancement and Visualization of the Wooden Sculpture Restoration Process». *Procedia Computer Science*, 67 (Dsai): 340-347.
- JAMALI, S. S.; SHIRATUDDIN, M. F.; WONG, K. W., y OSKAM, C. L. (2015): «Utilising Mobile-Augmented Reality for Learning Human Anatomy». *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. Elsevier B. V., pp. 659-668.
- KIM, S. L.; SUK, H. J.; KANG, J. H.; JUNG, J. M.; LAINE, T. H., y WESTLIN, J. (2014): «Using Unity 3D to facilitate mobile augmented reality game development». Internet of Things (WF-IoT), IEEE World Forum on, pp. 21-26.
- KWIK, F., y BAHANA, R. (2015): «Using Augmented Reality to Enhance Aetherpet, a Prototype of a Social Game». *Procedia Computer Science*, Elsevier Masson SAS, 59 (Iccsci), pp. 282-290.
- LÓPEZ-MONTALVO, E., y DOMINGO, I. (2009): «Nuevas técnicas aplicadas a la documentación gráfica del Arte Levantino: valoración crítica del método tras una década de experimentación». *El arte rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica. 10 años en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO*, pp. 295-302.
- LÓPEZ-MONTALVO, E.; VILLAVARDE, V.; ROLDÁN, C.; MURCIA, S., y BADAL, E. (2014): «An approximation to the study of black pigments in Cova Remigia (Castellón, Spain): Technical and cultural assessments of the use of carbon-based black pigments in Spanish Levantine Rock Art». *Journal of Archaeological Science*, 52 (0): 535-545.

- MARK, R., y BILLO, E. (2006): «Computer-assisted photographic documentation of rock art». *Mosaic a Journal for the Interdisciplinary Study of Literature*, (11): 10-14.
- MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H., y LANE, S. N. (2015): «Structure from Motion (SfM)». *Photogrammetry, Geomorphological Techniques*, 2: 1-12.
- PEÑA, D. (2002): *Análisis de datos multivariantes* (1.^a ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- PÉREZ, J. M. (2015): «e-ARt realidad aumentada y arte rupestre». En XXXIV Reunión de Asociaciones y Entidades para la Defensa del Patrimonio Cultural y su Entorno, pp. 1-4.
- PIERDICCA, R.; FRONTONI, E.; ZINGARETTI, P.; MALINVERNI, E. S.; COLOSI, F., y ORAZI, R. (2015): «Making Visible the Invisible. Augmented Reality Visualization for 3D Reconstructions of Archaeological Sites». En *Augmented and virtual reality: Second International Conference, AVR 2015*, 9254, pp. 25-37.
- RIDEL, B.; REUTER, P.; LAVIOLE, J.; MELLADO, N.; COUTURE, N., y GRANIER, X. (2014): «The Revealing Flashlight». *Journal on Computing and Cultural Heritage*, 7 (2): 1-18.
- ROGERIO-CANDELERIA, M. Á. (2015): «Digital image analysis based study, recording, and protection of painted rock art. Some Iberian experiences». *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, Elsevier, 2 (2-3): 68-78.
- (2013): «Experiencias en la documentación de pintura rupestre utilizando técnicas de análisis de imagen: avances hacia el establecimiento de protocolos de documentación no invasivos». *Cuadernos de Arte Rupestre, Centro de Estudios de Prehistoria y Arte Rupestre*, 6 (mayo 2010): 53-67 [en línea] Disponible en: <<http://cuadernosdearterupestre.es>>.
- ROLDÁN, C.; FERRERO, J.; MURCIA-MASCARÓS, S.; VILLAVARDE, V.; MARTÍNEZ, R.; GUILLEM, P. M.; DOMINGO, I., y LÓPEZ, E. (2007): «Análisis in situ de pigmentos de las pinturas rupestres de los abrigos VII, VIII y IX de La Saltadora mediante fluorescencia de Rayos-X». En *Los abrigos VII, VIII y IX de Les Coves de La Saltadora*, pp. 191-209.
- ROLDÁN, C.; MURCIA-MASCARÓS, S.; FERRERO, J.; VILLAVARDE, V.; LÓPEZ, E. DOMINGO, I.; MARTÍNEZ, R., y GUILLEM, P. M. (2010): «Application of field portable EDXRF spectrometry to analysis of pigments of Levantine rock art». *X-Ray Spectrometry*, 39 (3): 243-250.
- UNESCO (2016): «Rock Art of the Mediterranean Basin on the Iberian Peninsula» [en línea]. Disponible en: <<http://whc.unesco.org/en/list/874>> [consulta: 15 de octubre de 2016].
- VICENT GARCÍA, J. M.; MONTERO RUIZ, I.; RODRÍGUEZ ALCALDE, Á. L.; MARTÍNEZ NAVARRETE, M.^a I., y CHAPA BRUNET, T. (1996): «Aplicación de la imagen multiespectral al estudio y conservación del arte rupestre postpaleolítico». *Trabajos de prehistoria*, 53 (2): 19-35.

Sandstone, Heritage Documentation Software. Aplicación a la restauración del Pórtico de la Gloria de la catedral de Santiago de Compostela

Iñaki Koroso

Fundación Catedral Santa María. Vitoria-Gasteiz
ikoroso@catedralvitoria.eus

Equipo de trabajo:

Norma Barbacci, Pablo Longoria y Ed Guillén

World Monuments Fund

Ana Laborde

Instituto del Patrimonio Cultural de España

Marta Gómez y Carmen Moral

Fundación Catedral de Santiago

Leandro Cámara e Iñaki Koroso

Fundación Catedral Santa María

Resumen: Sandstone, Heritage Documentation Software es el nombre de un software aplicado a la documentación del patrimonio desarrollado en diferentes fases y en el que han colaborado el World Monuments Fund (WMF), la Fundación Catedral Santa María (FCSM), la Fundación Catedral de Santiago (FCS), la Fundación Barrie y el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE).

Las entidades que forman el equipo de trabajo tienen una amplia experiencia en la conservación del patrimonio y se han asociado para desarrollar Sandstone y generar una aplicación distribuble que permitiese gestionar eficazmente la información asociada a los procesos de restauración de monumentos.

La aplicación práctica del trabajo se está realizando en el Pórtico de la Gloria de la catedral de Santiago de Compostela y recoge todos los aspectos que desarrolla Sandstone, codificación de elementos, generación de formularios, edición geométrica, identificación de atributos (patologías, marcas de cantero, analíticas...), gestión de la documentación, generación de planos temáticos y salvaguarda de todos los datos.

Palabras clave: Base de datos espaciales, sistema de información geográfica, software, patrimonio, documentación

Abstract: Sandstone, Heritage Documentation Software is the name of program applied to heritage documentation implemented in different stages and directed by the World Monuments

Fund (WMF), the Santa María Cathedral Foundation (FCSM), the Santiago Cathedral Foundation (FCS), the Barrie Foundation and the Spanish Cultural Heritage Institute (IPCE).

The organisations that form the work team have extensive experience in the conservation of heritage and joined forces to develop Sandstone and generate an application that can be distributed and that enables the information associated with the monument restoration processes to be managed efficiently.

The project is being applied practically at the «Portal of Glory» of the Cathedral of Santiago de Compostela and includes all aspects implemented in Sandstone: coding of components, generation of forms, geometric editing, identification of attributes (pathologies, quarry marks, analysis, etc.), documentation management, generation of thematic maps and safeguarding of all data.

Keywords: Spatial database, geographic information system, GIS, software, heritage, documentation.

Antecedentes

La primera fase de Sandstone fue desarrollada con el apoyo del World Monuments Fund (WMF) y la compañía Integrated Conservation Resources (ICR). En esta primera fase se definió la arquitectura del sistema y se implementaron algunas herramientas de gestión. Se realizó un prototipo de aplicación que se instaló en diferentes equipos (PC sobremesa, portátil, Tablet PC) y se aplican al estudio y documentación de diferentes elementos como es el claustro de St Trophine en Arles, Francia, o la iglesia de la Trinidad y la capilla de San Pablo, en Nueva York.

En base a los resultados de estos trabajos, el Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE) junto a WMF e ICR plantean realizar una experiencia piloto con el programa de Sandstone incorporando información relativa al Pórtico de la Gloria de la catedral de Santiago de Compostela. El objetivo es obtener una herramienta útil para la gestión del patrimonio que sea distribuable y personalizable por el usuario manteniendo la arquitectura original de Sandstone. Esta herramienta debe estar orientada a la restauración, simplificando la infinidad de opciones que nos ofrecen los programas GIS, pero manteniendo su potencial en aquellos puntos necesarios para el adecuado mantenimiento del edificio patrimonial.

Para dirigir esta tarea se incorpora la Fundación Catedral Santa María (FCSM), que tiene una gran experiencia en la gestión digital de la documentación geométrica y temática asociada al monumento, concretada en el Sistema de Información Monumental (SIM) desarrollado en la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz.

Todo este proceso de reflexión conjunto desemboca en un acuerdo de intenciones entre el World Monuments Fund (WMF), la Fundación Catedral Santa María de Vitoria-Gasteiz (FCSM), la Fundación Catedral de Santiago (FCS), la Fundación Barrie y el Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE) para la creación de un software específico para la conservación del patrimonio: es lo que hemos llamado Sandstone, Heritage Documentation Software.

Introducción

Sandstone es un sistema de documentación del patrimonio que se basa en otros programas o librerías de código abierto y que tiene el objetivo de ser una herramienta integral para el adecuado registro y gestión de elementos patrimoniales. La documentación del monumento incluye su geometría, la información específica sobre diferentes aspectos de la restauración, imágenes, documentos, etc. La gestión de todos estos datos se hace de forma conjunta, conformando un sistema de información geográfica para elementos patrimoniales.

En la actualidad existe una amplia oferta de programas con software propietario (Autocad Map, Arc Gis...) y de código abierto (gvSIG, QGIS, uDig...) que permiten trabajar con información geométrica y atributos asociados ofreciendo multitud de posibilidades y opciones al usuario. Sin embargo, entre los profesionales que trabajan en restauración se manifiesta de forma recurrente que la gran cantidad de programas y opciones disponibles dificultan el aprendizaje y, como consecuencia, se prescinde de la potencia de los sistemas de información geográfica y de las bases de datos espaciales.

El principal reto de Sandstone es crear una herramienta GIS cuya usabilidad sea lo suficientemente satisfactoria para que invite al restaurador a utilizarla en su proyecto y a su vez desarrolle todas las potencialidades que nos ofrecen las bases de datos espaciales. En este camino ha sido importante la experiencia del Sistema de Información del Monumento utilizado en la catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz que ha aportado el conocimiento teórico y práctico en bases de datos relacionales necesario para completar esta tarea.

Una herramienta de esta naturaleza solo puede ser colaborativa, fruto del conocimiento, metodología y trabajo de diferentes equipos en diferentes momentos, y como tal se presenta a continuación, como una herramienta al servicio de la comunidad para conocer mejor a nuestros monumentos y gestionar eficazmente su documentación.

Aspectos técnicos de Sandstone

El núcleo de la aplicación de Sandstone se basa en uDig (User-friendly Desktop Internet GIS), que es un programa GIS de código abierto para aplicaciones de escritorio desarrollado sobre Eclipse RCP. Asimismo, Eclipse RCP es un software compuesto por un conjunto de herramientas de programación de código abierto multiplataforma que está especializado en el desarrollo de aplicaciones de cliente enriquecido (RCP, Rich Client Platform). Todos los datos geométricos y temáticos son almacenados y gestionados en PostgreSQL, que es uno de los sistemas gestores de base de datos relacionales más potentes del mercado. PostgreSQL comenzó a desarrollarse hace veinte años y se ha consolidado como una alternativa de código abierto a otros softwares propietarios en lo que se refiere a estabilidad, potencia, robustez e implementación de estándares.

La gestión de los datos geométricos se realiza desde PostGIS, que es un módulo que añade soporte para objetos geográficos a PostgreSQL, con lo que podemos referirnos al conjunto PostgreSQL-PostGIS como una base de datos espacial que sirve datos para su utilización en un sistema de información geográfica.

Teniendo como base todas las aplicaciones descritas anteriormente, se desarrolla el módulo que hemos denominado Sandstone GIS. Este módulo es desarrollado por el World Monuments Fund y la empresa ICR (Integrated Conservation Resources) utilizando el lenguaje multiplataforma JAVA. Se diseña el modelo de datos que viene explicado en el siguiente capítulo y se implementan algunas de las herramientas de gestión que se utilizan actualmente en Sandstone.

Asimismo, se ha desarrollado un módulo de gestión de datos denominado Sandstone Library que implementa nuevas funciones en Sandstone y que ha sido desarrollado por la Fundación Catedral Santa María y programado en lenguaje .NET por la empresa K3code. Sandstone Library trabaja sobre la misma base de datos y además de gestionar los datos alfanuméricos controla la gestión de ficheros externos, la generación de mapas temáticos y el sistema de copias de seguridad y restauración.

Para realizar la instalación el usuario debe instalar PostgreSQL, PostGIS, Sandstone GIS y Sandstone Library. Por defecto se utiliza el ordenador cliente como servidor de datos, por lo que hablaremos de una instalación en local; sin embargo, es posible conectarse con un servidor PostgreSQL en remoto, por lo que estaríamos hablando de una aplicación cliente-servidor.

Se han establecido diferentes perfiles de usuarios que utilizarán Sandstone y que se describen a continuación (figura 1):

- Nivel usuario: accede a toda la información y puede añadir nuevos sitios, proyectos, objetos y condiciones utilizando los formularios y las listas desarrolladas. Es decir, es el usuario tipo de Sandstone que busca un programa sencillo, visual e intuitivo para gestionar los datos de los estudios asociados al elemento patrimonial.
- Nivel avanzado: permite la elaboración de nuevas listas y formularios. Puede editar datos alfanuméricos en bloque, acceder a la edición avanzada de datos geométricos y gestionar los datos de Sandstone desde otros programas como Access, Autocad Map, GvSig, etc. Este usuario será el encargado de poner en marcha el proyecto y se podrá

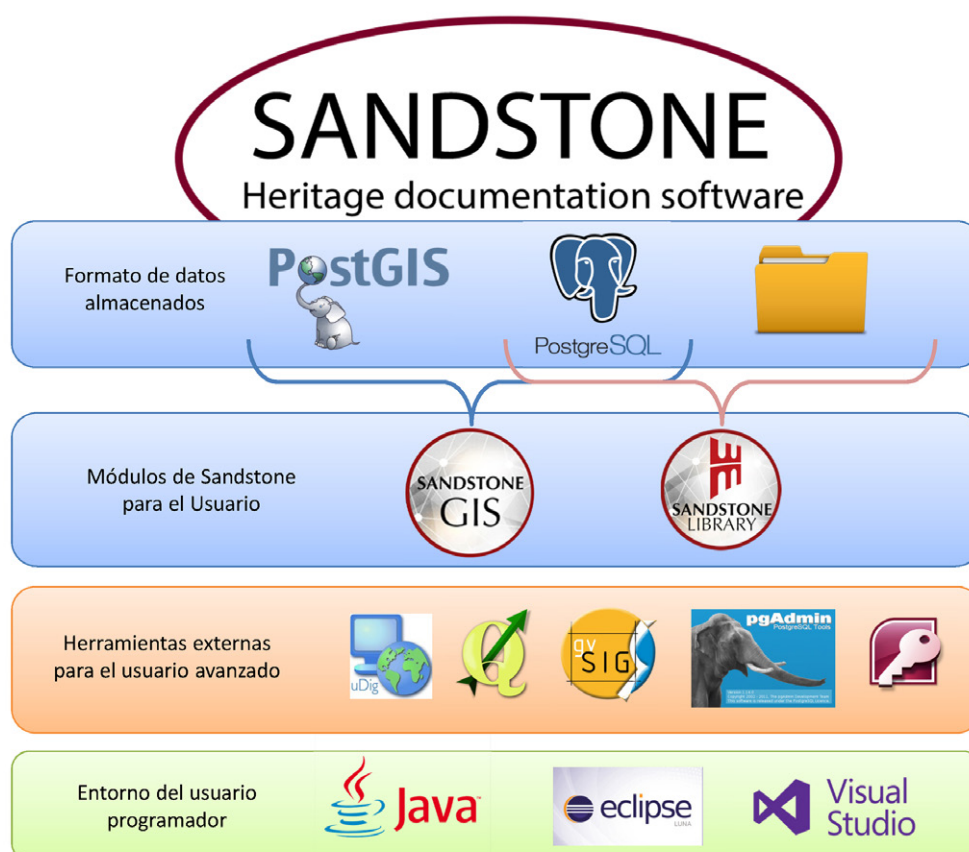


Figura 1. Distribución de programas en función del tipo de usuario

recurrir a él para realizar alguna tarea específica del proyecto que se esté ejecutando. La formación que deberá tener este usuario avanzado es la correspondiente a un usuario medio de PostgreSQL, y además deberá conocer la estructura de datos interna de Sandstone; sin embargo, no será necesario que maneje características avanzadas de base de datos ni conocimientos de lenguajes de programación.

- Nivel programador: es el encargado de generar nuevas funciones en Sandstone y su trabajo va más allá que la personalización del entorno. Debe tener conocimientos avanzados en PostgreSQL y PostGIS y manejar lenguajes de programación como Java y el entorno .NET y estar familiarizado con Eclipse RCP y uDig.

Modelo de datos de Sandstone

La elección de la herramienta de gestión viene determinada por su adecuación a la documentación disponible y a la metodología de la investigación. Es muy diferente partir de una documentación geométrica basada en polilíneas, ortofotografías o nubes de puntos, y ni que decir tiene si nuestra documentación es 2D o 3D. No existe la herramienta perfecta de gestión y normalmente la relación entre versatilidad y facilidad de manejo es inversamente proporcional.

Es por ello que Sandstone toma partido en esta dicotomía y reduce multitud de posibilidades que nos ofrecen los programas GIS, estableciendo un modelo de datos propio y diseñando una serie de herramientas que son de gran utilidad en la gestión del patrimonio. Como todos los programas, Sandstone tiene un *front-end*, o interfaz del usuario, y un *back-end*, o motor de datos. Si ponemos el foco en el usuario podemos decir que en el universo Sandstone existen seis tipos de elementos y nuestro proyecto se debe estructurar en función de estos elementos. Esto condiciona inevitablemente la metodología de documentación, pero es necesario para simplificar el funcionamiento del GIS permitiendo al usuario dominar el programa y obtener resultados satisfactorios con un tiempo de aprendizaje reducido.

Clases de datos

Sitios

Los «sitios» representan el ámbito general en el que se realiza la investigación. Habitualmente será el conjunto monumental que se va a documentar. Es el nivel superior, y a partir de este elemento se definirán los proyectos que se explican en el segundo punto. En el apartado práctico hemos definido como «sitio» a la catedral de Santiago de Compostela. Cada «sitio» viene definido por una capa de fondo que suele ser habitualmente una planta del elemento. Esta planta está escalada y georreferenciada respecto al *datum* elegido por el usuario.

Proyectos

Los «proyectos» representan las zonas principales en las que trabajar, normalmente alzados, que contienen los elementos concretos que se quieren documentar, como esculturas o elementos constructivos. Cada proyecto se representa por una o varias imágenes que se georreferencian sobre el «sitio» y se establece la escala para poder trabajar correctamente.

Objetos

Una vez que hemos «contextualizado» el entorno de trabajo definiendo el «sitio» y «proyecto», llega el momento de documentar en detalle. Para ello Sandstone GIS denomina «objetos»

a aquellas partes o sectores en los que dividimos nuestro proyecto. Los «objetos» son entidades geométricas que tienen asociados valores alfanuméricos y ficheros externos, y además pueden ser mostrados con diferentes estilos de visualización en función de sus valores asociados (formularios) o intrínsecos (longitud, superficie). Los «objetos» son portadores además de información alfanumérica incrustada. La mayor parte de esta información se refiere a parámetros internos del programa, pero también se han habilitado los campos clave, etiqueta y área para que el usuario edite estos valores que forman parte indivisible de los objetos.

En el caso del Pórtico de la Gloria hemos individualizado cada elemento de tal forma que cada escultura o relieve representa un «objeto».

Condiciones

Las condiciones son entidades geométricas similares a los «objetos» pero que se aplican para definir atributos sobre los «proyectos». Es decir, si los «objetos» descomponen el «proyecto» en diferentes partes que no se solapan entre sí, las «condiciones» caracterizan temáticamente al «proyecto» desde diferentes puntos de vista. Por ejemplo, en nuestro «proyecto» localizaremos las patologías presentes y las dibujaremos creando «condiciones». Cuando apliquemos un tratamiento específico lo indicaremos en el proyecto generando un nuevo polígono de «condición», y así sucesivamente con otras «condiciones» como «marcas de cantero», «policromías», «análisis estratigráfico», etc. Al igual que los «objetos», las «condiciones» también poseen información alfanumérica incrustada y esta tiene las mismas características que en los «objetos».

Formularios

Cada vez que creamos un elemento en Sandstone, ya sea «sitio», «proyecto», «objeto» o «condición», asociamos una serie de valores alfanuméricos a los nuevos elementos, y para ello nos valemos de la herramienta de «formularios». Los campos de estos formularios están definidos previamente por un usuario avanzado en función de los objetivos de su investigación. Estos campos se pueden organizar en despleables, casillas de selección, etc., y no es necesario que el usuario complete todos los campos. Únicamente aquellos campos que han sido rellenados quedarán registrados. Las herramientas de consulta de Sandstone permiten realizar consultas sobre los valores introducidos en el «formulario» y mostrar los «objetos» o «condiciones» que cumplen con los criterios de la consulta. Los «formularios» son totalmente personalizables y es de gran importancia que los investigadores definan correctamente los campos de cada «formulario», ya que la capacidad de gestión de la información dependerá en buena medida de esa decisión.

Información externa

El proceso de restauración de un bien cultural no es un hecho ajeno al propio monumento, sino que es la continuación de todo su proceso de construcción y mantenimiento. Es por ello por lo que en torno al monumento se maneja una gran cantidad de información en forma de fotografías, investigaciones, vídeos, noticias, actas, intervenciones, presupuestos y muchos otros documentos que deben ser tenidos en cuenta. Sandstone incorpora a su sistema toda esta información contenida en ficheros de diferentes formatos, organizando toda la documentación en función de los «objetos» y «condiciones» que se han añadido al «proyecto», de tal forma que cuando consultamos un elemento en concreto sabemos cuántos ficheros tiene asociados y podemos consultarlos pulsando una tecla.

En definitiva, como se puede ver en la figura 2 los elementos que conforman el modelo de datos se articulan entre sí formando un conjunto organizado de información. Por

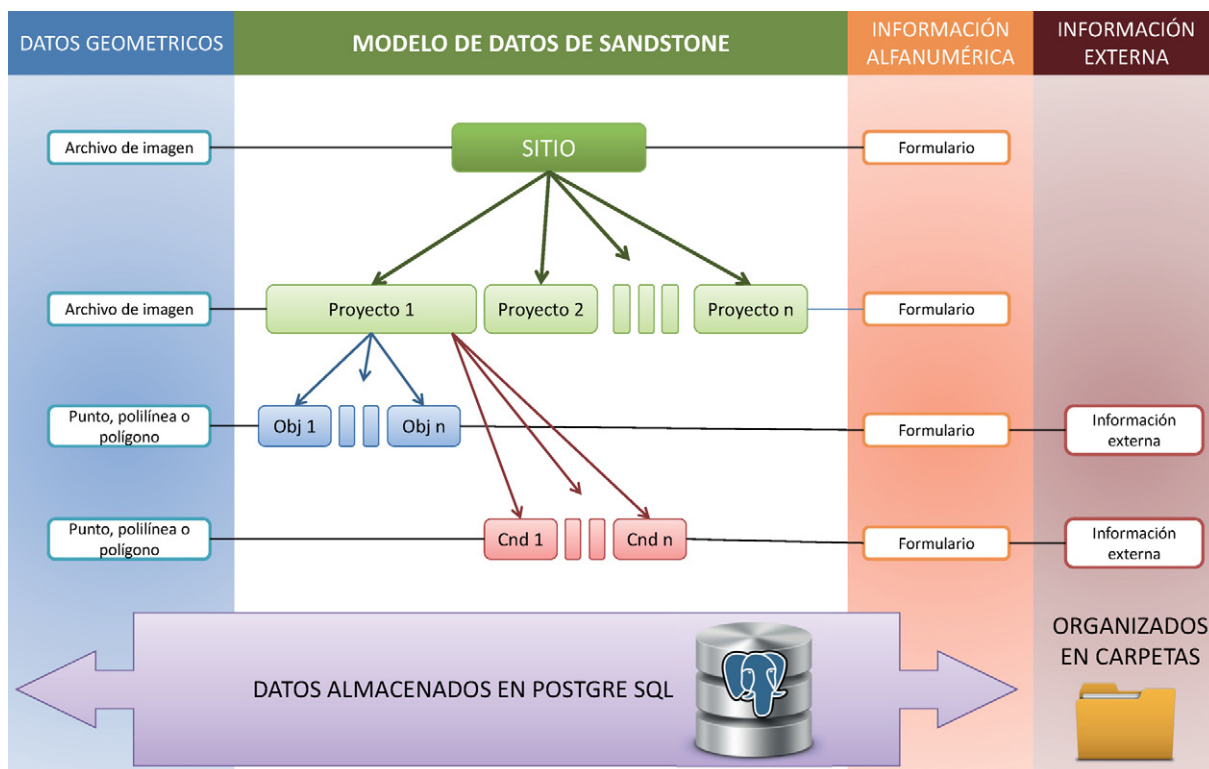


Figura 2. Esquema de los diferentes tipos de datos utilizados en Sandstone.

un lado ubicamos espacialmente al monumento en su conjunto («sitio») y lo desarrollamos en «proyectos», y posteriormente subdividimos cada «proyecto» en unidades (elementos constructivos, artísticos, esculturas) que se denominan «objetos». Por otro lado, nos acercamos al monumento desde diferentes disciplinas, extrayendo desde cada «proyecto» información temática que se superpone a las unidades que hemos definido. Nos estamos refiriendo a los estudios de litología, patología de la piedra, labores polícromas, tratamientos realizados, marcas de cantero, etc., que se identifican como «condiciones». Tanto los objetos como las «condiciones» tienen asociados una serie de campos en función de su temática («formularios») y también pueden tener asociada información en ficheros externos («información externa»).

Gestión de la información

Anteriormente hemos visto los diferentes tipos de información que podemos utilizar para documentar todos los aspectos de la restauración. En este apartado veremos cómo podemos gestionar esta documentación para acceder a la información que realmente buscamos, clasificarla en función de diferentes criterios, relacionar diferentes tipos de datos para extraer conclusiones y visualizarla con diferentes estilos.

Sandstone GIS (figura 3) es la herramienta de edición gráfica del programa y gestiona los datos geométricos y alfanuméricos. Nos permite consultar directamente sobre el proyecto señalando un objeto/condición y viendo su información incrustada. También nos posibilita definir una serie de valores en el formulario asociado y visualizar aquellos objetos/condiciones que cumplen con estos requisitos. Sandstone simplifica esta tarea utilizando casillas desplegables, por lo que no es necesario conocer el lenguaje SQL para crear una consulta compleja.

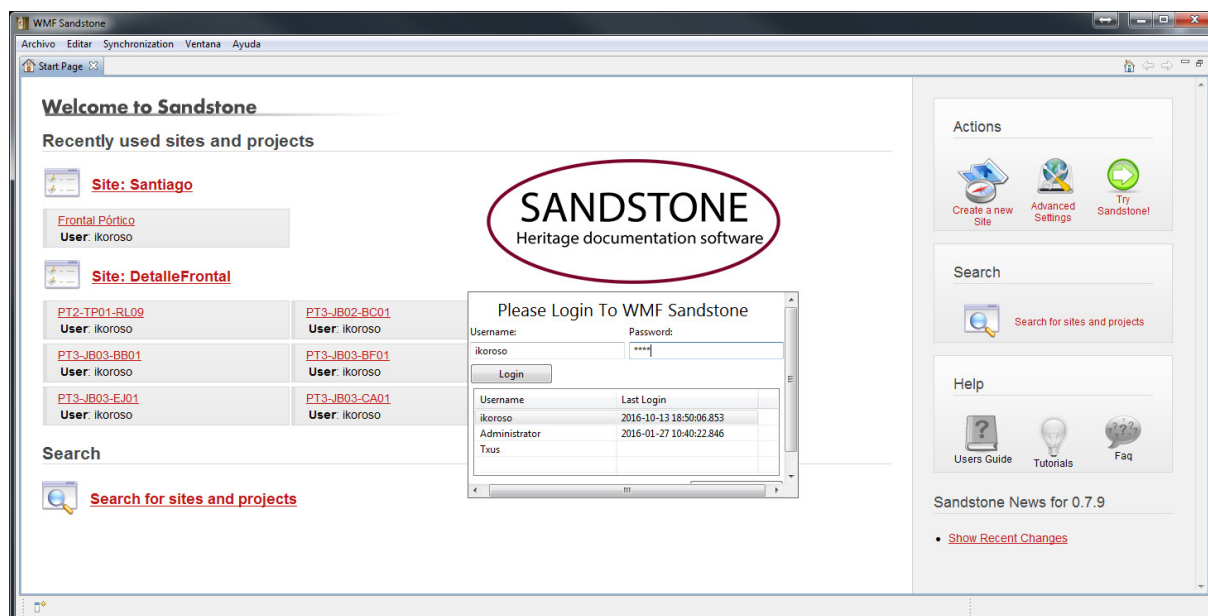


Figura 3. Pantalla de inicio de Sandstone GIS.

Desde esta herramienta Sandstone relaciona las «condiciones» con los «objetos» a partir de la información indicada en los formularios y también en función de la posición espacial que ocupan.

La herramienta Sandstone Library está diseñada para ser utilizada en tareas que no requieran trabajar con la información geométrica. Una de estas herramientas es el catálogo de datos de Sandstone, que permite navegar por los «sitios», «proyectos», «objetos» y «condiciones» y conocer todos los valores asociados. Asimismo, facilita el acceso directamente a la carpeta donde se ubica la información externa relacionada.

Otra de las herramientas de Library nos permite diseñar planos temáticos que se mostrarán en Sandstone GIS. Consiste en un asistente que habilita al usuario navegar por el catálogo de Sandstone y, en base a casilla, despleables generadas automáticamente, definir campos índice que generan planos temáticos directamente. Además, se permite que el usuario avanzado cree temas SQL y diseñe el estilo de visualización.

Los objetos y condiciones contienen una definición geométrica y además poseen una serie de campos de información alfanumérica. Sandstone Library desarrolla un conjunto de herramientas para que esta información incrustada pueda ser actualizada con la información asociada al formulario.

Por último, cabe la posibilidad de guardar todos los datos de un «sitio» o «proyecto» en un archivo de *backup*. En este archivo se incluye toda la información del «sitio» o «proyecto» elegido, tanto la información geométrica del «proyecto» y de los «objetos» y «condiciones» como la información alfanumérica utilizada en los «formularios».

En definitiva, el usuario puede gestionar de forma sencilla tanto las características de la información geométrica (longitudes, áreas, superposiciones) como de la información asociada en formularios, y puede elegir entre visualizar directamente los datos o crear mapas temáticos en función de diferentes criterios.

Herramientas para el usuario avanzado. *Back-end* de Sandstone

En diseño de software se denomina *back-end* a la parte de proceso de datos introducidos desde la *interface* de presentación o *front-end*. En nuestro caso, el *back-end* abre un abanico de posibilidades al usuario avanzado para personalizar una gran cantidad de procesos que no se pueden realizar desde el *front-end* o interfaz de usuario.

Toda la programación de Sandstone GIS se soporta sobre una serie de tablas de PostgreSQL (figura 4). Si se conoce cómo utiliza el programa los registros de estas tablas, podemos actuar sobre el programa modificando los valores de las tablas. Todo lo que aparece en Sandstone GIS (excepto la información externa, como su propio nombre indica), desde los datos de los formularios, los polígonos de objetos y condiciones, las imágenes base de sitios y proyecto e incluso las características de los planos temáticos seleccionados, se guardan en la tabla Sandstone de la base de datos PostgreSQL. Editando estos datos podremos crear nuevos formularios, borrar cualquier elemento, modificar registros, editar cualquier polígono, modificar imágenes base e incluso utilizar otros programas GIS para visualizar los datos.

Hemos comentado que la sencillez de manejo de Sandstone se ha conseguido simplificando el abanico de opciones que se ofrecen en los programas GIS, pero podría darse el caso de que se necesite utilizar una herramienta específica para una tarea importante y Sandstone no lo permitiese. Conociendo la estructura de la base de datos es posible utilizar otros programas como Autocad Map o GvSig para editar y gestionar los elementos de Sandstone. Otro ejemplo de la potencia del *back-end* es la posibilidad de utilizar directamente la consola de datos de PostgreSQL. Como luego veremos, un usuario avanzado puede realizar en 10 líneas

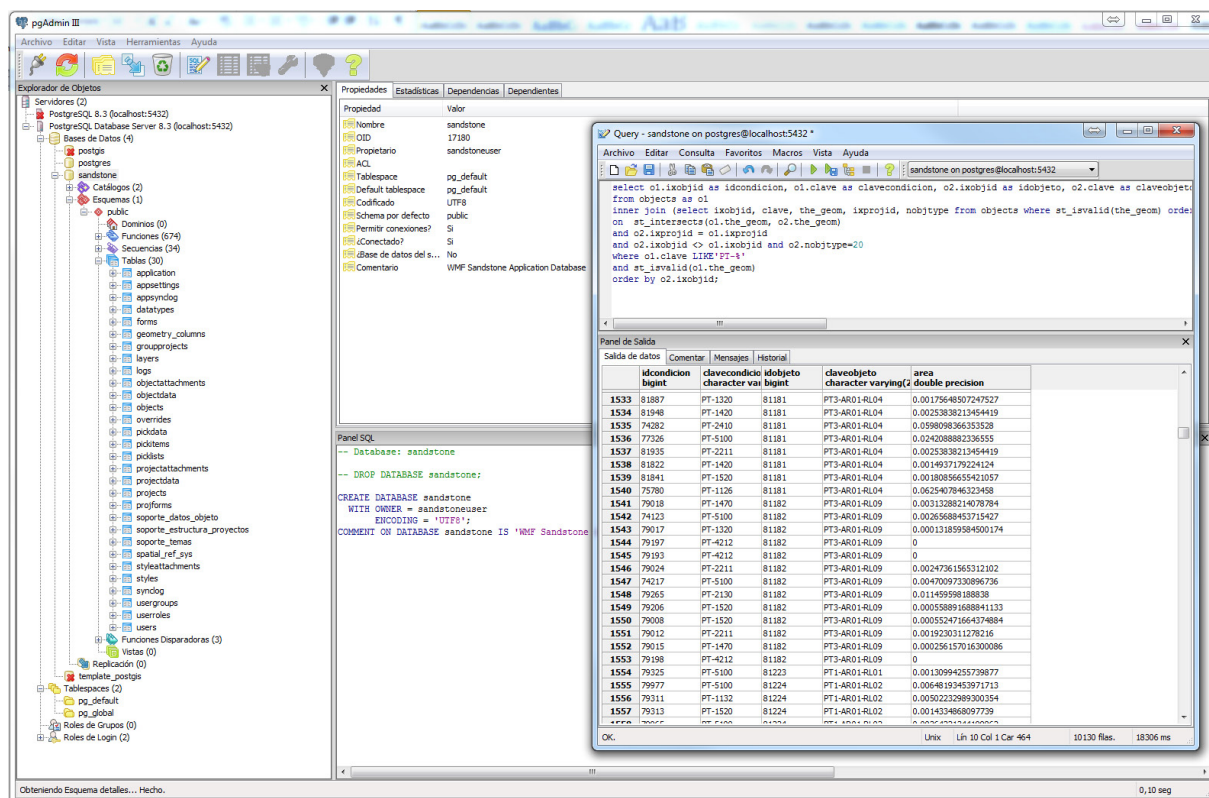


Figura 4. Todos los datos se estructuran en tablas que se almacenan en el *back-end* y se pueden gestionar desde programas como PgAdmin III.

de código una consulta SQL para ver qué patologías afectan a cada uno de los objetos de la portada central del Pórtico de la Gloria y el programa nos da un minucioso listado con las áreas afectadas por cada patología en cada elemento. Este listado es muy útil para la realización de mediciones y presupuesto del tratamiento que se vaya a realizar.

Por último, aprovechando que todos los datos están estructurados en tablas se puede realizar copias de seguridad de sitios y proyectos desde Sandstone Library, y si el usuario lo desea se pueden restaurar en cualquier ordenador en el que esté instalado Sandstone.

El ejemplo del Pórtico de la Gloria de Santiago

A lo largo de este artículo hemos ido desgranando las características y cualidades del programa. Es una tarea complicada describir conceptos y herramientas sin referirnos a una aplicación práctica concreta. A continuación se describe cómo se ha realizado –en el momento de escribir este artículo la restauración está en proceso– la documentación de la restauración del Pórtico de la Gloria desde el momento de planificación del trabajo hasta el de gestión de la información registrada.

La primera tarea, común a cualquier trabajo de documentación, consiste en planificar la investigación. En nuestro caso, consistió en sectorizar los diferentes elementos del Pórtico y en asignar una clave única para cada elemento. Posteriormente se realizó una ingente tarea de recopilación de todos los estudios, fotografías, documentos..., referidos al Pórtico de la Gloria referenciando cada uno con el elemento correspondiente. Finalmente, se definieron los campos que iban a formar parte de los formularios asociados a objetos y condiciones. El caso de las condiciones es significativo, ya que se ha diseñado un formulario en el que hay que elegir el tipo de estudio y después rellenar los campos correspondientes. En concreto, el formulario está diseñado para capturar datos de piedras y morteros, patologías, tratamientos, pruebas, analíticas, estratigrafías, marcas de cantero, labores policromas y capas de policromías.

El segundo paso es la configuración de Sandstone para empezar a documentar el trabajo. Para esta tarea se diseñan los formularios y se preparan las capas que se van a utilizar para el sitio «Santiago» y los diferentes proyectos «frontal pórtico», «bóvedas», «contrafachada» y «muros fronteros».

El tercer paso consiste en dibujar los objetos y en rellenar los campos del formulario asociado. Una vez creados los objetos, se elaborarán las carpetas donde incorporaremos toda la información externa asociada a dichos objetos.

El cuarto paso es el más costoso, es el trabajo de campo para estudiar de forma minuciosa cada elemento y dibujarlo en Sandstone y asignarle los campos correspondientes. En nuestro caso se había establecido una codificación en función de las patologías que podían aparecer (siguiendo los criterios del Proyecto COREMANS) y a partir de desplegables se podían ir seleccionando los valores correspondientes (figura 5).

El último paso se refiere a todas las herramientas de gestión, consulta, ejecución de planos temáticos y realización de copias de seguridad. Estas tareas son ejecutadas directamente por un usuario básico y, si fuera necesario, por un usuario avanzado para consultas muy específicas del proyecto, como extraer un listado de patologías que afectan a un objeto determinado (figuras 6, 7 y 8).

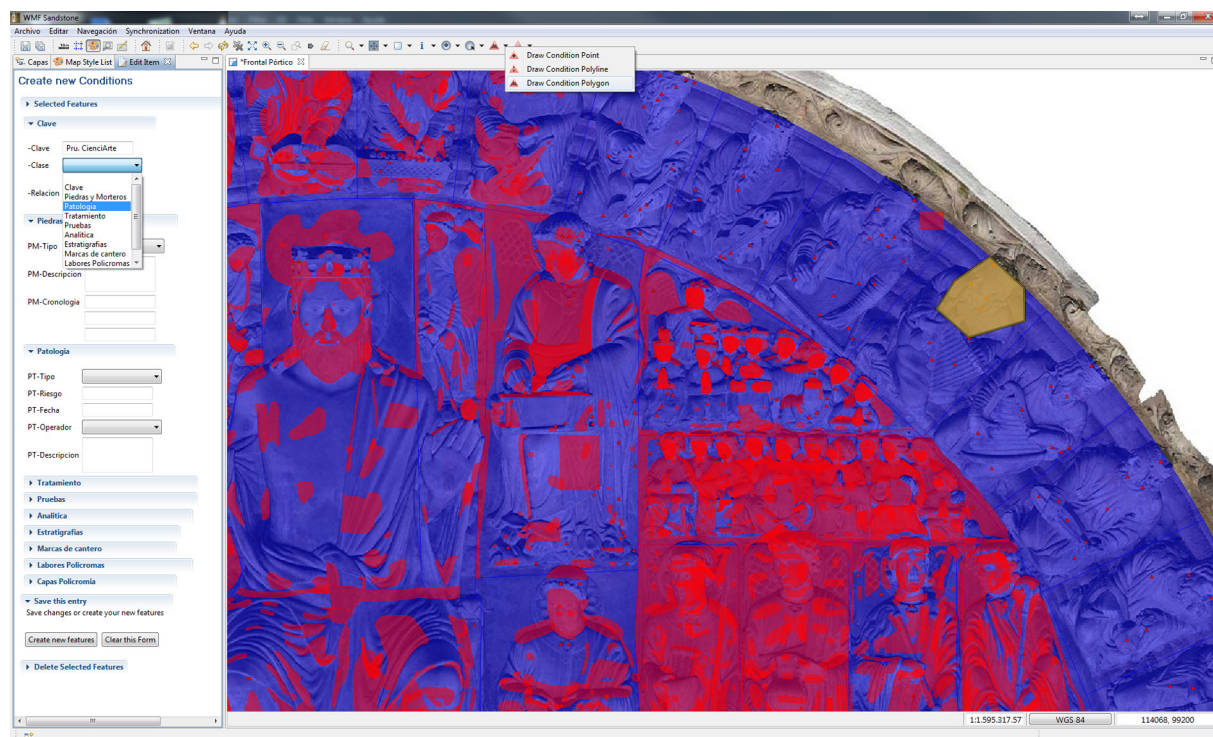


Figura 5. Incorporación de patologías con el dibujado de «condiciones» y edición de datos asociados en el formulario correspondiente.

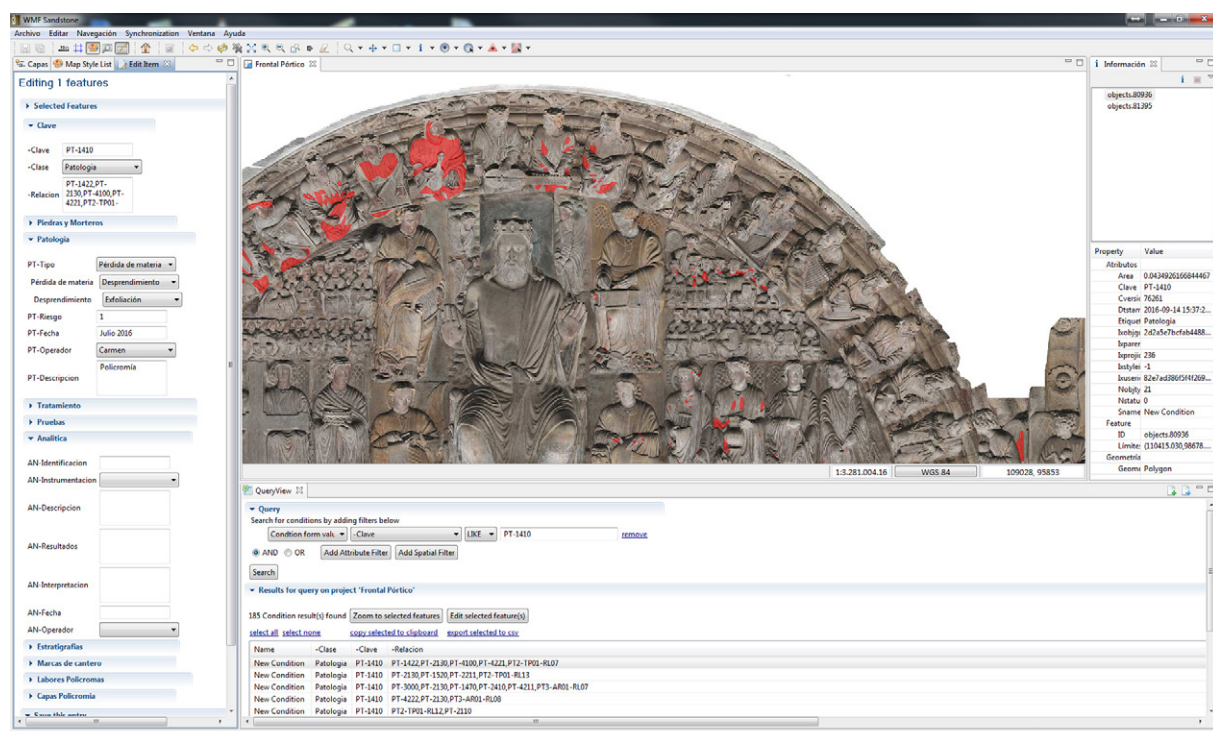
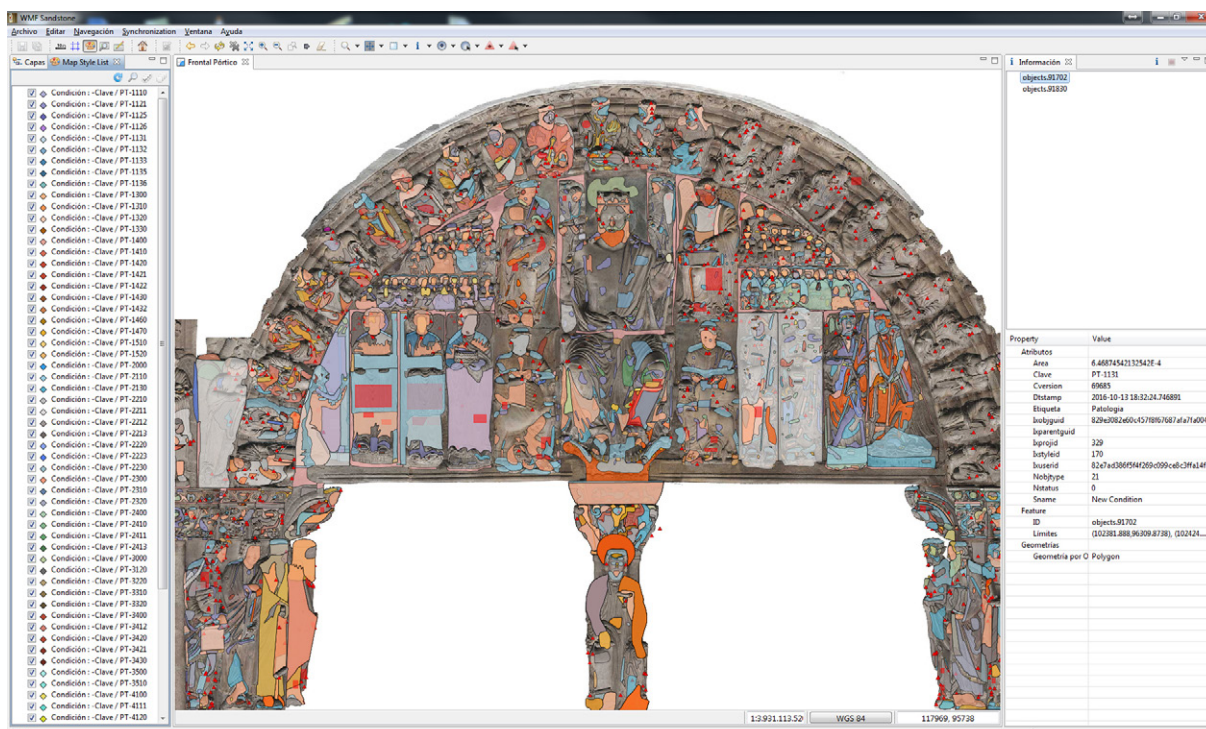


Figura 6. Edición de datos asociados a una consulta SQL definida mediante el asistente de Sandstone GIS.



Figura 7. Consola de datos alfanuméricos y gestión de datos externos en Sandstone Library.



Conclusiones

Sandstone, Heritage Documentation Software es un programa realizado por y para profesionales de la restauración. Su característica principal consiste en tener un modelo de datos orientado al patrimonio que le permite simplificar procedimientos para realizar análisis complejos y precisamente por ello es un programa con buena usabilidad que habilita al usuario para manejar la aplicación de forma cómoda y eficiente.

La metodología empleada para el desarrollo del software se puede calificar de colaborativa, no solo porque varios equipos han trabajado en momentos diferentes desarrollando Sandstone, sino también porque en el centro de todo el trabajo no se encuentra la promoción de una marca o un desarrollo de un programa comercial, sino ofrecer a la comunidad una herramienta que redunde en beneficio del patrimonio histórico.

La accesibilidad a los datos introducidos en Sandstone está garantizada más allá del recorrido de Sandstone (que esperemos sea largo), ya que su almacenamiento se realiza en una base de datos como es PostgreSQL, que puede ser manejada desde infinidad de programas comerciales y de código abierto. Esta característica prioriza al monumento y a su documentación sobre el propio programa.

Durante el desarrollo de los trabajos de documentación del Pórtico de la Gloria en Santiago de Compostela se han validado los objetivos de Sandstone, que ha demostrado ser una muy buena herramienta para la documentación de bienes culturales. Además, ha permitido mejorar algunos aspectos y plantear nuevos retos a desarrollar en el futuro.

Bibliografía

- AZKARATE, A.; CÁMARA, L.; LASAGABASTER, J. I., y LATORRE, P. (2001): *Plan Director de Restauración. Catedral Santa María*. 2 vols. Diputación Foral de Álava.
- AZKARATE, A., y SOLAUN, J. L. (2013): *Arqueología e historia de una ciudad. Los orígenes de Vitoria-Gasteiz*, 2 vols. Universidad del País Vasco (UPV-EHU) y Fundación Catedral Santa María.
- LABORDE MARQUEZE, A. (ed.) (2013): *Proyecto COREMANS: Criterios de intervención en materiales pétreos*. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, Subdirección General de Documentación y Publicaciones.
- uDig <http://uDig.refractions.net/>
- Eclipse <http://www.eclipse.org/>
- [https://es.wikipedia.org/wiki/Eclipse_\(software\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Eclipse_(software))
- PostgreSQL <http://www.postgresql.org/es/>
- PostGIS <http://www.postgis.net/>

La realidad aumentada aplicada a la conservación. Proyecto IVAPTA. Estudio y conocimiento de alteraciones en pintura sobre tela

María-José González-López

Universidad de Sevilla
baglioni@us.es

Beatriz Prado-Campos

Universidad de Sevilla
bprado@us.es

Resumen: El proyecto Indicadores Visuales de Alteración en Pintura sobre Tela, IVAPTA, es un proyecto seleccionado por el Secretariado de Recursos Audiovisuales y Nuevas Tecnologías (SAV) de la Universidad de Sevilla (II Plan Propio de Docencia, convocatoria 2015). En este proyecto se desarrolla una aplicación informática para dispositivos móviles de realidad aumentada aplicada al área de conocimiento de los bienes culturales. Su principal objetivo es acercar el conocimiento y la detección de las alteraciones al ámbito profesional, pedagógico y a la sociedad en general. El recurso comprende los indicadores visuales de alteración existente en una obra pictórica sobre tela; en este caso, en la pintura *Inmaculada Concepción*, atribuida a Meneses, propiedad del Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor. La aplicación resultante es una herramienta de consulta fácil, asequible, visual y descriptiva que consiente a los agentes implicados en el estudio, la docencia, la investigación y la intervención en BBCC, conocer, reconocer y evaluar el nivel de riesgo que representa para la integridad del bien.

Palabras claves: Realidad aumentada, alteraciones, pintura sobre tela y bienes culturales

Abstract: The Visual Indicators of Alterations for Paintings on Canvas Project (IVAPTA) was selected by the Secretariado de Recursos Audiovisuales y Nuevas Tecnologías (SAV) of the Universidad de Sevilla (II Plan Propio de Docencia, convocation 2015). This project has developed a software application for mobile devices enabling Augmented Reality to utilise the field of knowledge relating to a cultural artefact. The aims of the application are to identify and illustrate alterations and degradation of a cultural artefact and present them to the educational community and society in general. The resource includes visual indicators of the alterations in a painting on canvas; in this case those in the work *Immaculate Conception*, attributed to Meneses and owned by the City of Sanlúcar la Mayor (Seville). The final application is user-friendly, affordable, visual and descriptive and allows people who are involved in the study, teaching, research and restoration of cultural artefacts to recognize, appreciate and evaluate the level of risk they pose to the integrity of the artefact.

Key words: Augmented Reality, alteration, decay, painting toile and cultural property.

Introducción

Nuestra sociedad está cada vez más caracterizada por el uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en todos los ámbitos de la vida, y resulta difícil imaginar un mundo sin dispositivos móviles conectados a Internet. Su democratización, así como el desarrollo de recursos tecnológicos a partir de experiencias virtuales, realidad aumentada o realidad inmersiva, están modificando progresivamente nuestra forma de comunicarnos e interactuar con el mundo real. Rápidamente se han convertido en un medio esencial para la divulgación del Patrimonio Cultural en todas sus vertientes: investigación, intervención, difusión y formación.

Concretamente, la realidad aumentada (en adelante, RA) se ha empleado en proyectos de difusión e interpretación del Patrimonio Cultural, superponiendo recreaciones virtuales sobre entornos arqueológicos concretos¹, descollando una vez más el campo de la arqueología en la incorporación de nuevas metodologías y recursos tecnológicos aplicados a la interpretación de resultados (Ruiz, 2011b).

Pero... ¿qué es la RA? Es una tecnología digital que mezcla el mundo real con el mundo virtual, predominando la información física frente a la ilusoria. Se fundamenta en la superposición de información digital (imágenes, textos, audios y/o vídeos) sobre la visión concreta del mundo físico, mejorando así el canal de comunicación y sumergiendo al usuario en una realidad mixta (Milgram *et al.*, 1994), en donde a la experiencia real se le añaden nuevos contextos de información con los que poder interactuar e incrementar el conocimiento y experiencia sensorial.

La RA aplicada al patrimonio permite ir más allá de lo que los criterios conservativos y/o museológicos limitan. De este modo, la tecnología RA se consolida como una herramienta muy eficaz de diálogo entre la obra y el espectador, e interacción y acercamiento al público en general (Gómez y Quirosa, 2009)². Este potencial lo han detectado rápidamente los departamentos pedagógicos de los museos, que han encontrado en la realidad virtual y RA una forma de comunicar más efectiva y creativa (Bimber y Ramesh, 2005), que bajo la denominación «edutainment» (Ruiz, 2011a) presentan contenidos que mezclan el entretenimiento y la educación³. Aplicada al campo de la conservación y restauración, hasta ahora son pocas las incorporaciones o bien no se han difundido en canales específicos del área. Tímidamente se van conociendo algunos proyectos concretos, como el que se ha llevado a cabo en la catedral de Valencia⁴. Con respecto a su aplicación a bienes culturales concretos, y específicamente relacionado con su estudio, conservación y/o restauración, por el momento desconocemos posibles propuestas.

Proyecto IVAPTA: indicadores visuales de alteración de pintura sobre tela

El proyecto IVAPTA es pionero en el estudio de los bienes culturales singulares, no solo por centrarse en una de las tipologías de bienes culturales más numerosa en nuestro país, la pin-

¹ Destacan el proyecto pionero ARQUEOGUIDE (2002), en Grecia (Kangdon, 2012; Ruiz, 2011b; Vlahakis, V. *et al.*, 2002); el proyecto LIFEPLUS, en Pompeya; ENAME 974, en Bélgica, y grupo GRIHO en España (Ruiz, 2011b).

² Destacan los proyectos *Dar al Yund de Madinat al-Zahra* (Córdoba, 1990), interpretación de los Parques Arqueológicos en Castilla-La Mancha (empresa Balawat, 1994), paseo virtual 3D por el monasterio de Santo Domingo de Silos en Burgos o la reproducción de las pinturas de Santa María de Mur (Gómez y Quirosa, 2009).

³ Algunos ejemplos son: Centro de Interpretación de la Orden Militar de Calatrava (Alcaudete, Jaén), Museo de Autonomía de Andalucía (Coria del Río, Sevilla), Centro de Interpretación de la Tecnología (Zamudio, Bizkaia), Museo Virtual de la Informática de la Universidad de Castilla-La Mancha y Museo Jurásico de Asturias (Ruiz, 2011a).

⁴ Se ha recreado una bóveda barroca, actualmente desmontada, y un retablo de plata desaparecido en la Guerra de la Independencia (Ruiz, 2011b).

tura sobre tela, sino también por la novedad de la temática abordada: sus principales alteraciones. La selección del tema no es aleatoria, sino que viene condicionada por dos parámetros fundamentales: el primero, relacionado con su idoneidad, ya que las aplicaciones y recursos multimedia para este tipo de bienes no son muy numerosos, y el segundo, por el enfoque conferido al estudio de las alteraciones, que difiere considerablemente del otorgado tradicionalmente; de aquí la importancia y oportunidad de este proyecto.

Metodología. Desde la idea a la producción

Para la consecución de este recurso multimedia en RA se ha establecido una estructura organizada en dos líneas de trabajos muy diferentes pero complementarias. La primera comprende desde la concepción de la idea y desarrollo del proyecto, al seguimiento del recurso, realizada por las profesoras del grado en Conservación y Restauración de Bienes Culturales que suscriben este artículo, y la segunda, a la fase de producción del recurso por parte del Secretariado de Recursos Audiovisuales y Nuevas Tecnologías (SAV) de la Universidad de Sevilla⁵ (figura 1).

En este artículo nos centraremos fundamentalmente en el desarrollo de la primera línea de trabajo, aunque reflejaremos los parámetros básicos seguidos en su producción.

Selección de la obra. Para el desarrollo de este proyecto se ha escogido la pintura al óleo sobre tela que representa a la Inmaculada Concepción, atribuida a Francisco Meneses Osorio, discípulo de Bartolomé Esteban Murillo, propiedad del Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor. En conjunto, esta obra reúne los requisitos idóneos para efectuar la investigación planteada con este proyecto y para la obtención del recurso final buscado (figuras 2 y 3).

Indicadores visuales de alteración. En el planteamiento seguido en el estudio de las alteraciones es donde más se evidencia el componente investigador del proyecto. Se buscaba efectuar un compendio de alteraciones indicativas de la pintura sobre tela que fuese más allá de la concepción tradicional con la que se ha venido abordando el estudio de los deterioros y daños en la literatura especializada en este tipo de obras.

Por lo general, el estudio de las alteraciones se ha venido asociando únicamente con el conocimiento y descripción del daño que podemos percibir en estos bienes culturales, sin considerar las causas o el proceso de deterioro que originan los cambios indeseados producidos en su estructura o en su superficie, y que, sin embargo, son responsables de las modificaciones de sus características y propiedades, afectando notablemente a su integridad o a su percepción⁶.

Con independencia del enfoque parcial expuesto, se detecta otro problema importante que se centra en la confusión terminológica con las cuales se suelen nombrar. En la literatura especializada, encontramos alteraciones enunciadas con términos que están más próximos con las causas de origen que con la manifestación del deterioro que nos permite su identificación

⁵ Este proyecto se encuentra entre los diez seleccionados en la Convocatoria de Producción de Recursos de Realidad Aumentada (curso 2015-2016) en el marco del II Plan Propio de Docencia de la Universidad de Sevilla (línea de acción 1.3.1 «Innovación docente y análisis de las metodologías. Uso de las TIC y elaboración de materiales en red»), para la producción de objetos de aprendizaje bajo la modalidad de *apps* de «Realidad Aumentada» http://realidadaugmentada.us.es/index.php?option=com_content&view=article&id=90:convo4-2&catid=13&Itemid=121 [fecha de consulta: 18 de octubre de 2016].

⁶ Entendiendo como alteración la transformación de las características, tangibles o intangibles, de un bien cultural producidas por envejecimiento y exposición a factores ambientales y/o humanos.



Figura 1. Francisco Meneses (atribuido): *Inmaculada Concepción* (anverso), siglo XVII. Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor, Sevilla. Fotografía: María-José González-López.



Figura 2. Francisco Meneses (atribuido): *Inmaculada Concepción* (reverso), siglo XVII. Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor, Sevilla. Fotografía: María-José González-López.

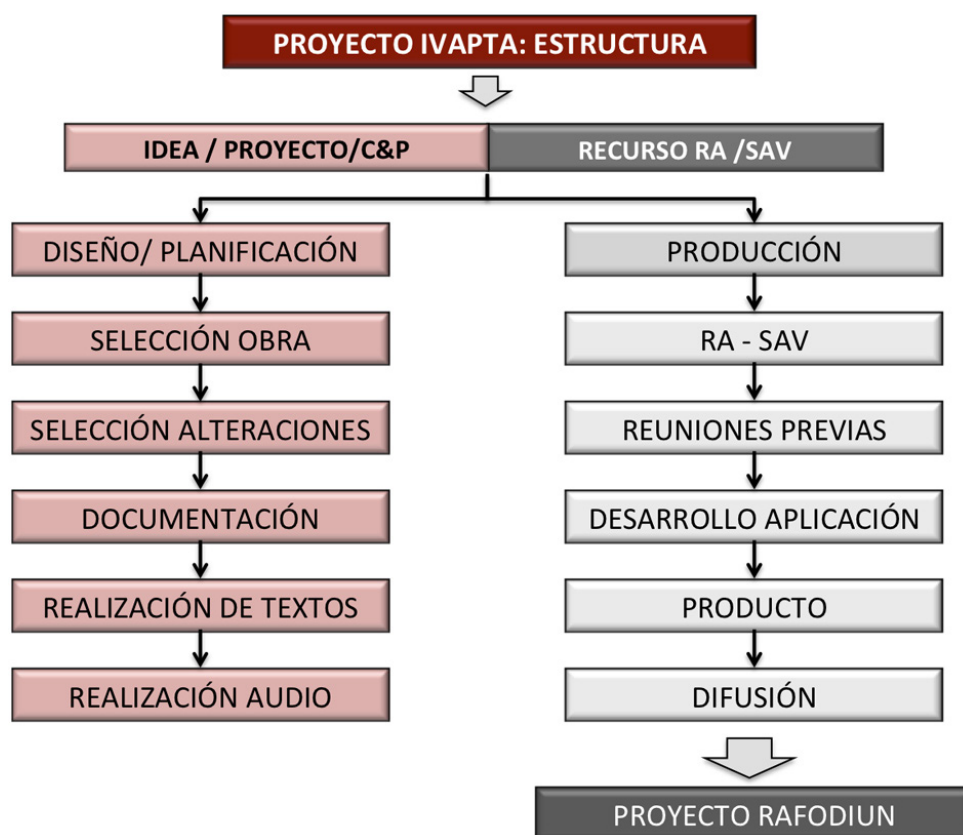


Figura 3. Estructura del proyecto IVAPTA. Infografía: María-José González-López.

y, consecuentemente, por su singularidad y características, su denominación. Un ejemplo de lo expresado lo constituye el vocablo «hongos»; de hecho, no es raro encontrarlo descrito como deterioro, siendo por el contrario, causa de origen de ciertos daños asociados a su incidencia y, derivados de su acción, deterioros reconocibles visualmente y que en sí mismos constituyen la verdadera alteración: «mancha, disgregación, coloración o pudrición», todos ellos indicadores visuales de alteración, consecuencia del ataque microbiológico.

Todo ello justifica que en este proyecto se aborde el estudio y la clasificación de las alteraciones, a partir de la manifestación por la cual somos capaces de reconocerlas e identificarlas, considerando además el nivel donde se produce, la causa de origen y los mecanismos y procesos que la desarrollan, es decir, concibiéndolos como indicadores visuales de alteración, concepto más asociado a los bienes culturales de naturaleza pétreo, pero como vemos en este trabajo puede y de hecho es extensible a cualquier otra tipología de bienes culturales.

Estructura y organización de la información. Se parte de una estructura lógica en la que quedan adscritos los descriptores considerados, ordenados tanto alfabéticamente, como de forma jerarquizada, agrupándose en este último caso por familias de alteraciones. La estructura jerárquica en familias reúne grupos de descriptores con características comunes, a los que se les ha asignado para facilitar su identificación un código de color distintivo. Esta clasificación, sin duda, más novedosa e intuitiva, constituye el verdadero motor de búsqueda del recurso multimedia (figura 4).

INDICADORES VISUALES DE ALTERACIÓN PINTURA SOBRE TELA: ESTRUCTURA Y CLASIFICACIÓN		
LISTADO ALFABÉTICO	FAMILIA DE ALTERACIONES	
1. Agujero	ALTERACIÓN CROMÁTICA: ANVERSO • Depósito superficial • Irregularidad en el barniz • Mancha • Oxidación del barniz • Pasmado REVERSO • Cambio cromático • Corrosión • Depósito superficial • Mancha • Migración de aglutinante	PÉRDIDA DE SUJECCIÓN/ADHESIÓN: ANVERSO: 1. Desclavado 2. Levantamiento 3. Pérdida de pieza 4. Separación de pieza PÉRDIDA MATERICA: ANVERSO: 1. Arañazo 2. Desgaste 3. Laguna REVERSO: 4. Agujero 5. Arañazo 6. Galería ROTURA: ANVERSO: 1. Corte 2. Cuarteado 3. Desgarro 4. Grieta 5. Roto REVERSO: 2. Deshilachado
2. Arañazo		
3. Arruga		
4. Cambio cromático		
5. Corrosión		
6. Corte		
7. Cuarteado		
8. Curvatura		
9. Depósito superficial		
10. Desgarro		
11. Desgaste	DEFORMACIÓN: ANVERSO • Arruga • Destensado • Marca • Ondulación REVERSO 1. Curvatura 2. Ondulación INTERVENCIÓN ANTERIOR: ANVERSO 1. Repinte REVERSO 1. Parche	
12. Deshilachado		
13. Destensado		
14. Disgregación		
15. Galería		
16. Grieta		
17. Irregularidad en el barniz		
18. Laguna		
19. Levantamiento		
20. Limpieza defectuosa		
21. Mancha		
22. Marca		
23. Migración de aglutinante		
24. Ondulación		
25. Oxidación del barniz		
26. Parche		
27. Pasmado		
28. Pérdida de pieza		
29. Pliegue		
30. Repinte		
31. Roto		
32. Separación de pieza		

Figura 4. Organización de la información. Clasificación de los indicadores visuales de alteración. Infografía: María-José González-López.

Con objeto de disponer de una información normalizada de cada uno de los indicadores visuales de alteración considerados, y siguiendo con la metodología de trabajo establecida, se ha sistematizado la captación de datos de cada descriptor. Para ello se ha partido de una ficha base, específicamente diseñada para el proyecto, que contempla de cada indicador tres niveles de información (figura 5). El primero se corresponde con el campo textual; el segundo, con el visual, y el tercero y último, con el audio:

- *Nivel textual*. Recoge los datos del indicador que permite su descripción e identificación, poniéndolo en relación con la causa y con los mecanismos de desarrollo. Se realiza en el código de color establecido para la familia asignada en la estructura jerárquica.

En la definición de las alteraciones se han considerado las realizadas por los especialistas del sector (Calvo, 2002; Villarquide, 2005; Giannini y Roani, 2008), además de las que aparecen en los diccionarios usuales, siendo de gran utilidad la consulta de la aplicación de la Real Academia Española: el *Nuevo tesoro lexicográfico de la lengua española (NTLLE)*, que pone a disposición del usuario todo el léxico de la lengua española desde el siglo xv hasta el xx⁷. Partiendo de estas referencias, se ha optado en este proyecto por elaborar definiciones propias de cada uno de los términos considerados.

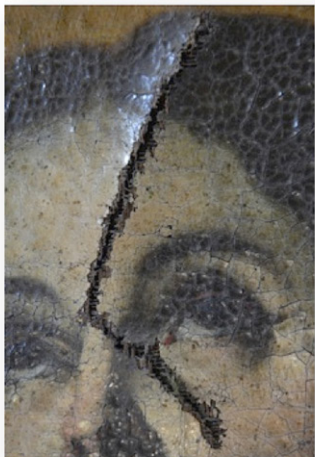
HERRAMIENTAS DE CAPTACIÓN DE DATOS: • Ficha • Documentación • Textos • Audio	
EJEMPLO DE FICHA CUMPLIMENTADA	
1.- Corte <u>Familia:</u> rotura. <u>Nivel:</u> soporte y conjunto pictórico. <u>Definición:</u> ruptura regular del soporte textil con pérdida de materia pictórica, localizada en sus bordes. <u>Causa de origen:</u> • Físico: factor antrópico (actos vandálicos) y, en menor medida, accidentes fortuitos. <u>Manifestación:</u> se suele presentar como un raja que traspasa la obra en su conjunto y adquiere distintas formas, según la intencionalidad. Los bordes de la ruptura son limpios, característicos del factor antrópico (actos vandálicos). <u>Otras denominaciones:</u> raja o rasgado. <u>Definición audio:</u> un corte es una ruptura de la obra que afecta a todos sus estratos constitutivos, desde el soporte hasta el color. Dependiendo de la intencionalidad de la agresión, de su carácter fortuito o del tiempo transcurrido, los bordes de la raja aparecerán limpios, más o menos deformados y sin desgarros.	

Figura 5. Estructura de la ficha de captación de datos. Infografía: María-José González-López.

⁷ Esta aplicación se puede consultar en el siguiente enlace electrónico:
<http://www.rae.es/recursos/diccionarios/diccionarios-antiores-1726-1992/nuevo-tesoro-lexicografico> [fecha de consulta: 18 de octubre de 2016].

- *Nivel visual*. Se ha pretendido que este recurso sea muy visual desde el inicio, por lo que se ha buscado que la imagen seleccionada fuese representativa de la alteración y fácilmente reconocible e identificable por el usuario final del recurso.
- *Nivel audio*. Voz en *off* que describe brevemente la alteración. En la ficha de captación de datos este campo se corresponde con un texto resaltado en negrilla, que es sustituido en la aplicación del recurso por la voz en *off* reseñada. Este campo es fundamental en este proyecto, ya que amplía considerablemente el perfil del usuario del recurso, desde el especialista del sector, al personal en formación, al usuario de carácter generalista interesado en el tema o, con ciertas deficiencias y limitaciones sensoriales. El uso de esta opción en el recurso permite una consulta rápida del descriptor sin menoscabo de la calidad de la información que contiene.

Presentación interactiva de la información. Seleccionada y organizada la información que se va incluir en el recurso, el siguiente paso lo constituye la presentación de la información para facilitar la interactividad del receptor con las posibilidades de la aplicación en el dispositivo final: *smartphone*, *tablet*, etc.

La presentación y el acceso a la información en este proyecto se ha organizado teniendo siempre presente el nivel de RA con el que se va a conseguir la superposición de elementos virtuales en la vista de un entorno físico. En nuestro caso, el activador, elemento del mundo real que el software utiliza para reconocer y seleccionar la información virtual asociada que se debe añadir, está constituido por sendos marcadores que se corresponden en el anverso, con la imagen de la obra y, en el reverso, por un montaje en el que se ha posicionado sobre el revés la obra invertida⁸. Ambas imágenes, impresas o directamente desde el dispositivo de consulta, actúan como sendos marcadores, que posicionamos en el espacio real y que el sistema reconoce y utiliza como referencia donde añadir el modelo tridimensional virtual. También se puede utilizar la propia obra, con las limitaciones de acceso impuestas por su ubicación actual⁹.

Definidos los marcadores, el siguiente paso lógico lo constituye el posicionamiento de los descriptores, en nuestro caso los indicadores de alteración, en cada uno de ellos, siguiendo la clasificación por familia y el código numérico y de color asignado (figuras 6 y 7).

Todas estas pautas son muy importantes y deben ser consideradas desde el momento en que se concibe el proyecto y se desarrolla la idea, y deben ser aplicadas secuencialmente en cada una de las fases establecidas según la metodología prevista, sin perder de vista en ningún momento los requerimientos técnicos y de resolución que exige el recurso final en RA, ni el dispositivo usual de consulta, normalmente un *smartphone* o una *tablet*, cuya pantalla, por su tamaño, limita considerablemente el acceso a la información por parte del usuario.

Producción del recurso. Como ha quedado expuesto, este proyecto tiene dos líneas de trabajo complementarias: la primera se corresponde con la elaboración del recurso, y la segunda,

⁸ Por motivos técnicos no se ha podido utilizar como marcador la imagen del reverso de la pintura, ya que la uniformidad tonal y la falta de contraste de la imagen fotográfica impedía su reconocimiento por parte del sistema. Se han barajado distintas opciones para solventar este problema, siendo la más satisfactoria el montaje indicado. Conscientes de que esta solución podría ocasionar cierta confusión al usuario de la aplicación, se ha previsto en la aplicación IVAPTA reverso la posibilidad de acceso a la imagen real del dorso de la obra a fin de no distorsionar su percepción real. Con esta solución técnica se ha conseguido también interrelacionar de forma fácil e intuitiva las alteraciones existentes en ambas partes de la obra.

⁹ Cuando el marcador lo constituye la propia obra solo es viable por su ubicación la aplicación en RA del anverso, ya que la obra se encuentra colgada en el rellano de la escalera del Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor.



Figura 6. Posicionamiento de los indicadores en el anverso. Infografía: María-José González-López.



Figura 7. Posicionamiento de los indicadores en el reverso. Infografía: María-José González-López.

con la producción realizada íntegramente por los técnicos del SAV¹⁰ siguiendo su metodología de trabajo articulada en diferentes etapas, que brevemente resumimos a continuación:

1. Programación: que comprende la realización del proyecto con el programa Metaio, Creator y Metaio SDK ubicación de los componentes y programación. En esta fase se realiza la primera revisión.
2. Exportación: versión en lenguaje de programación AREL (*Augmented Reality Experience Language*), exportación *app* Android y retoques en el entorno de desarrollo Eclipse.
3. Corrección: revisión por parte del responsable del área y revisión por parte de los autores del recurso.
4. Publicación: realización de la ficha técnica del recurso, publicación en el canal de distribución y cumplimentación de datos definitivos. Elaboración de la versión en Windows y realización del instalador, y publicación en CD-ROM.
5. Integración: en los repositorios webs de la página del SAV, REPORAUS, RAFODIUM, o académicos, repositorio de objetos de aprendizaje de la Universidad de Sevilla (RODAS).

Acceso y uso del recurso

Los elementos necesarios para que se produzca una experiencia de RA son sencillos a nivel usuario, aunque soportados por complejos sistemas de hardware y software desarrollados en el campo de la ingeniería de la comunicación. Desde el punto de vista del usuario, solamente se necesita un dispositivo electrónico (móvil, tableta, ordenador, etc.) que contenga una cámara incorporada para poder captar la imagen del mundo real que active la información digital, y una pantalla donde se proyecten ambas realidades, la física y la virtual. La imagen activadora de la RA puede consistir en un objeto o espacio cualquiera, una imagen o un código QR. Previamente, el usuario debe haber descargado la aplicación que permita iniciar el procesamiento de la información, como lector QR o aplicación específica. Además, esta tecnología requiere necesariamente la conexión a Internet para poder enviar la información del entorno real al servidor remoto y recuperar la información virtual asociada que se superpone.

Para acceder al recurso IVAPTA ANVERSO e IVAPTA REVERSO se deben seguir las siguientes fases:

Fase 1. Descarga de las aplicaciones en los distintos dispositivos: móviles, tabletas u ordenadores tradicionales¹¹ (figura 8):

1. Se descarga la aplicación desde diversos canales: RepoRAUS, Google Play o App Store dependiendo del sistema que se use.
2. Una vez dentro de la *app* RepoRAUS, se accede a un listado de proyectos. Cada uno de ellos incluye un logotipo y su respectivo nombre. IVAPTA ANVERSO e IVAPTA REVERSO presentan un logo sencillo, relacionado con las Bellas Artes, que consiste en un icono que representa una paleta de pintor, en color verde para el anverso y fucsia para el reverso.

¹⁰ Para profundizar en el proceso de programación y exportación de los recursos en RA realizados por el SAV, recomendamos consultar la descripción detallada que encontramos en la revista *IJERI* (Cabero, García y Barroso, 2016).

¹¹ Enlace directo de descarga:

http://ra.sav.us.es/index.php?option=com_content&view=article&id=115:ivapta&catid=27:ra&Itemid=123 [fecha de consulta: 18 de octubre de 2016].

FASE 1: Descarga aplicación



Figura 8. Fase 1: descarga de las aplicaciones IVAPTA. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

3. Al pinchar en el enlace se despliega una pantalla donde aparece una breve descripción del recurso y una pestaña que debe ser pulsada para descargar la aplicación.

Fase 2. Detección del marcador. Este recurso está asociado a un elemento que activa el sistema de RA, concretamente la imagen del cuadro (anverso y reverso). La activación puede venir dada desde diversas fuentes (figura 9):

- a) La propia obra en su ubicación actual en el Ayuntamiento de Sanlúcar la Mayor. En este caso el recurso se limitaría a IVAPTA ANVERSO, ya que por sus dimensiones y método de exposición no es posible acceder al reverso.
- b) Descarga de la imagen desde la aplicación. Al abrir el recurso, aparece una pantalla de inicio con acceso a un icono «imprimir marcador», que permite descargarlo digitalmente. A continuación, se puede visualizar en una pantalla o bien imprimir la fotografía en sentido literal.

Fase 3. Uso de la herramienta RA. Para utilizar la herramienta se sigue la mecánica habitual en RA; una vez en la aplicación, se direcciona la cámara del dispositivo elegido por el usuario hacia el marcador que se haya determinado (imagen general del cuadro –anverso o reverso–), e inmediatamente, tras cargar los audios, aparecen los descriptores en la parte inferior de la pantalla, organizados por familias de alteraciones (figura 10). Al pulsar en cualquiera de ellos, se activa y en la zona superior aparece el nombre de la familia a la que va asociado, además de posicionar virtualmente los marcadores numéricos de los distintos indicadores visuales de alteración sobre la imagen del cuadro. El usuario puede ir pinchando en cada uno de los números directamente en la propia pantalla del dispositivo e irá apareciendo una imagen virtual que contiene la foto ampliada de la alteración al lado de la ficha descriptiva con información concreta de la misma. Simultáneamente se activa el audio de la descripción básica (figura 11). De esta forma, se puede interactuar intuitivamente y recibir la información de forma inmediata. Una vez finalizada la información audio, automáticamente aparece sobrepuesto a todas las imágenes compactadas (información visual-textual y marcador) un icono «Pulse para ver el texto en el navegador». Al pulsarlo redirige al usuario hacia un recurso web en donde la ficha inicial de información del indicador visual de alteración está

FASE 2: Detección del marcador (activador del recurso RA)



Figura 9. Fase 2: detección del marcador y activación del recurso RA. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

DESCRIPTORES POR FAMILIAS



Figura 10. Clasificación de los descriptores de indicadores visuales de alteración por familias. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

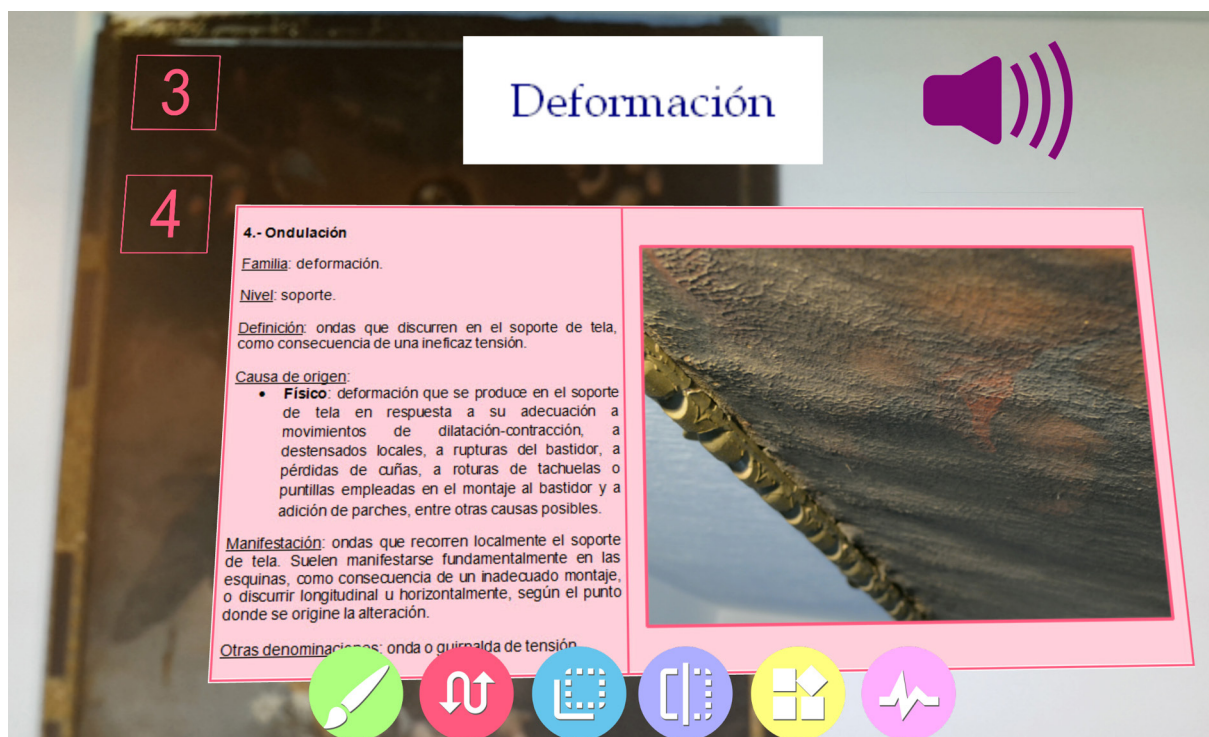


Figura 11. Activación del marcador numérico, información visual y audio. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

más ampliada, permitiendo, además, activar la imagen y visionarla en una nueva pantalla o descargarla¹² (figuras 12 y 13).

Resultados. Los logros de este proyecto los podemos estructurar en dos apartados diferentes:

- *En relación con el método.* El primero, relacionado con el concepto de alteración defendido en este trabajo que ha sentado las bases sobre las que se ha diseñado el Proyecto IVAPTA, validado por los años en los que se ha utilizado con éxito en la metodología de aprendizaje de la asignatura *Factores de deterioro y procesos de alteración* y en los trabajos académicos realizados por su alumnado¹³ sin detectarse fallos significativos de concepción o de contenido en el método establecido. Tras este extenso periodo de prueba, estamos en disposición de afirmar que la metodología docente puesta a punto ha demostrado su eficacia en el estudio, reconocimiento y registro de las alteraciones en bienes culturales.
- *En relación con el recurso:* destacar los siguientes:
A nivel investigador y docente, un logro fundamental ha sido, sin duda, la aceptación y elaboración del proyecto IVAPTA, realizada por el SAV en el marco del II Plan Propio de Docencia de la Universidad de Sevilla, aunque es importante destacar que este

¹² Como la aplicación en RA está pensada para poder visionarse en cualquier dispositivo, las distintas imágenes virtuales del recurso se adecuan a los respectivos formatos de pantallas, pudiendo aparecer a veces las imágenes que contiene distorsionadas. Con la solución adoptada, se puede ver en cualquier momento la imagen del detalle de la obra sin distorsión, además de permitir su descarga.

¹³ Desde 2011 hasta la actualidad se han estudiado con la misma metodología un total de 343 bienes muebles de diferentes tipologías.

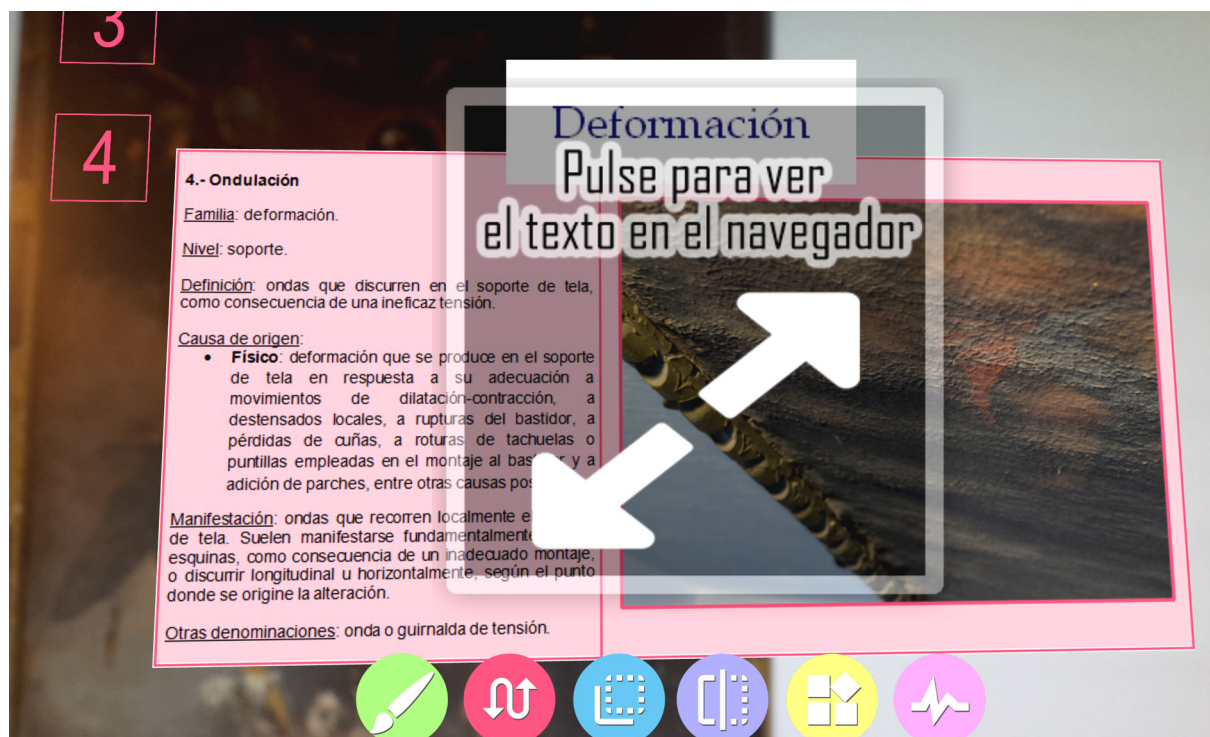


Figura 12. Activación del texto en el navegador, que redirige al usuario a la ficha descriptiva ampliada. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

FICHA WEB (información textual y visual)



Figura 13. Ficha web de cada indicador visual. Infografía: Beatriz Prado-Campos.

proyecto inicialmente estaba prevista su realización únicamente en el anverso de la obra. Desde el propio SAV, por su interés, idoneidad y grado de innovación, surge la propuesta de ampliación, abordando también su reverso, generándose, por tanto, dos aplicaciones independientes: IVAPTA Anverso e IVAPTA Reverso, lo que en sí mismo constituye un logro importante, ya que, de esta forma, el producto final resulta verdaderamente representativo de la pintura sobre tela.

Importante contribución a los recursos multimedia existentes en bienes culturales de esta tipología y temática, ya que contribuye al estudio y reconocimiento del deterioro de una tipología de obra de bienes culturales muy representativa de nuestro Patrimonio Cultural: la pintura sobre tela.

Dado el interés generado por el recurso en el propio SAV, este proyecto se ha seleccionado para formar parte del proyecto de I+D RAFODIUN (EDU2014-57446-P), Plan Estatal 2013-2016 Excelencia I + D, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad¹⁴.

Conclusiones

Puesto a punto el método, nuestra intención es continuar en esta línea de investigación abordando el estudio de las restantes tipologías de bienes culturales, sobre todo con los realizados en materiales orgánicos, que son los menos estudiados con esta metodología.

Su utilidad es válida no sólo para esta tipología de obras, sino también para aquellas otras asociadas, como son las obras pictóricas o escultóricas policromadas en soportes orgánicos.

Este recurso multimedia pone a disposición de los especialistas que intervienen y estudian el Patrimonio un recurso multimedia de utilidad en el desarrollo de su actividad profesional, a la vez que contribuye a la formación del futuro especialista en esta disciplina.

Esta aplicación, novedosa por su concepto y por la plataforma en la que se distribuye, se convierte sin lugar a duda en un instrumento de consulta o de trabajo, novedoso, y eficaz, que pone a disposición del usuario, profesional o en formación, información de calidad e inmediata, en un dispositivo habitual que todos tenemos a mano, nuestro propio móvil.

Por su concepción, es una herramienta de fácil acceso y consulta para el interesado en conocer los principales deterioros que inciden en este tipo de patrimonio, ya que la estructuración conferida en niveles de información diferente amplía los perfiles del usuario, desde el especialista en la materia al público en general, e incluso al que presenta ciertas limitaciones sensoriales.

La orientación generalista del recurso no va en menoscabo de la calidad de la información contenida, ya que ofrece datos suficientes sobre cada indicador considerado para efectuar su reconocimiento, poniéndolo en relación con la causa del deterioro, con el mecanismo que lo genera, contribuyendo de esta forma a la mejor evaluación del estado conservativo de los bienes culturales que conocemos, estudiamos o intervenimos. Esperamos desde este foro que su uso sea de tanta utilidad como lo es para nosotras.

¹⁴ El proyecto RAFODIUN se puede consultar en el siguiente enlace web: <http://intra.sav.us.es/proyectorafodiun/index.php> [fecha de consulta: 18 de octubre de 2016].

Agradecimientos

Quisiéramos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Secretariado de Recursos Audio-visuales y Nuevas Tecnologías (SAV) de la Universidad de Sevilla y en concreto, a Fernando García Jiménez y a Inés Casado Parada que han hecho posible este proyecto.

Bibliografía

- BIMBER, O., y RASKAR, R. (2005): «Spatial Augmented Reality Merging Real and Virtual Worlds» [en línea]. Massachusetts: Editorial A K Peters, Ltd. Wellesley. Disponible en: <<http://web.media.mit.edu/~raskar/SAR.pdf>> [consulta: 24 de agosto de 2016].
- CALVO MANUEL, A. (2006): *La conservación de la A a la Z*. Barcelona: El Serbal.
- CABERO ALMENARA, J.; GARCÍA JIMÉNEZ, F., y BARROSO OSUNA, J. (2016): «La producción de objetos de aprendizaje en “Realidad Aumentada”: la experiencia del SAV de la Universidad de Sevilla» [en línea]. *Revista IJERI*, 6: 110-123. Disponible en: <<https://www.upo.es/revistas/index.php/IJERI/article/view/1837>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- CORTÉS RUIZ, J. C., y RODRÍGUEZ VELÁZQUEZ, M. (2015): «Las TIC como oportunidad para conservar el patrimonio cultural» [en línea]. *Red Universitaria de Aprendizaje*. Disponible en: <<http://repositoriodigital.academica.mx/jspui/handle/987654321/482506>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- GIANNINI, C., y ROANI, R. (2008): *Diccionario de restauración y diagnóstico*. Editorial Nerea.
- GÓMEZ ROBLES, L., y QUIROSA GARCÍA, V. (2009): «Nuevas tecnologías para difundir el Patrimonio Cultural: las reconstrucciones virtuales en España». *Revista e-rph*, 4: 1-23. Disponible en: <<http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero4/estudiosgenerales/estudios/articulo.php>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- KANGDON, L. (2012): «Augmented Reality in Education and Training» [en línea]. Disponible en: <<https://quality4digitallearning.org/wp-content/uploads/2016/03/Augmented-Reality-in-Education-and-Training.pdf>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- MILGRAM, P.; TAKEMURA, H.; UTSUMI, A., y KISHINO, F. (1994): «Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum» [en línea]. *Telemanipulator and Telepresence Technologies*, 2351: 282-292. Disponible en: <http://web.cs.wpi.edu/~gogo/hive/papers/Milgram_Takemura_SPIE_1994.pdf> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- NMC HORIZON REPORT (2016): «Higher Education Edition» [en línea]. *Courtesy of Universidad Internacional de La Rioja-UNIR*. Disponible en: <<http://cdn.nmc.org/media/2016-nmc-horizon-report-HE-ES.pdf>> [consulta 18 de octubre de 2016].
- SALINAS, J. (2010): «Innovación docente y uso de las TIC en la enseñanza universitaria» [en línea]. *Universidad y Sociedad del Conocimiento*, 1(1): 1-16.
- PÉREZ DE CELIS HERRERO, C.; COSSIO AGUILAR, G., y LARA ÁLVAREZ, J. (2010): «Uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) para la catalogación y difusión del patrimonio cultural» [en línea]. *Revista Iberoamericana de Ciencia, Tecnología y Sociedad (CTS)*, 1-23. Disponible en: <http://www.revistacts.net/files/Portafolio/perez_de_celis_editado.pdf> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- RUIZ TORRES, D. (2011a) «Realidad aumentada, educación y museos» [en línea]. *Revista ICONO*, 14(2): 212-226. Disponible en: <<https://www.icono14.net/ojs/index.php/icono14/article/view/24>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- (2011b): «Realidad aumentada y Patrimonio Cultural: nuevas perspectivas para el conocimiento y la difusión del objeto cultural» [en línea]. *Revista e-rph*, 8: 1-22. Disponible en:

<<http://www.revistadepatrimonio.es/revistas/numero8/difusion/estudios2/articulo.php>>
[consulta: 18 de octubre de 2016].

TAPIA GÓMEZ, M. (2011): «Un lugar para el patrimonio. La conservación del patrimonio cultural en la red» [en línea]. *Ar@cne. Revista electrónica de recursos en Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*, 53. Disponible en: <<http://www.ub.es/geocrit/aracne/aracne-153.htm>> [consulta: 18 de octubre de 2016].

VLAHAKIS, V. *et al.* (2002): «Archeoguide: an augmented reality guide for archaeological sites. Athens (Greece)» [en línea]. *Computer Graphics and Applications, IEEE*, 22: 52-60. Disponible en: <https://webserver2.tecgraf.puc-rio.br/~mgattass/ra/ref/RA_Ruinas/01028726.pdf> [consulta: 18 de octubre de 2016].

VILLAR, C. *et al.* (2012): «Realidad Aumentada aplicada al patrimonio museístico: el proyecto europeo ArtSense» [en línea]. *Series Iberoamericanas de Museología*, 3: 191-200. Disponible en: <https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/11514/57117_14.pdf?sequence=1> [consulta: 18 de octubre de 2016].

VILLARQUIDE, J. A. (2005): *La pintura sobre tela. Alteraciones, materiales y tratamientos de restauración*. Vols. I y II. Barcelona: Nerea.

Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: investigación y aplicación (CREMEL II)

**Emilio Cano, Blanca Ramírez Barat, Ana Crespo, David M. Bastidas
y Teresa Palomar**

Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM), CSIC, Madrid
ecano@cenim.csic.es

Soledad Díaz y Emma García

Instituto del Patrimonio Cultural de España (IPCE), MECD, Madrid

Elena Martín

Museo Oteiza, Navarra

Gloria Pérez de Rada

Real Jardín Botánico (RJB), CSIC, Madrid

Resumen: Entre los años 2012-2014 el grupo de investigación COPAC del CENIM ha venido desarrollando el proyecto CREMEL («Conservación-restauración del Patrimonio Cultural metálico por técnicas electroquímicas: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento»). En el mismo, se pusieron a punto metodologías electroquímicas especialmente adaptadas para la evaluación de la capacidad protectora de pátinas formadas y recubrimientos aplicados sobre bienes culturales metálicos, desarrollando un equipo portátil que permite la realización *in situ* de estas medidas.

Se presenta en esta comunicación el proyecto CREMEL II («Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: investigación y aplicación»), en el que con la participación de un grupo interdisciplinar de investigadores se aborda la extensión de la aplicación de los desarrollos previos en colecciones específicas de patrimonio cultural metálico (escultura en exterior y en interior, arte contemporáneo, planchas calcográficas, etc.), de manera sistemática y realizando un seguimiento a lo largo del tiempo.

Palabras clave: Conservación, restauración, electroquímica, patrimonio cultural, museos, metal.

Abstract: Between 2012 and 2014, the COPAC research group of CENIM has been working in the CREMEL project: “Conservation-restoration of metallic cultural heritage by electrochemical techniques: development of a specific methodology adapted to diagnosis and treatment”. In it, electrochemical methodologies were set up specifically adapted to the assessment of the protective properties of patinas and coatings on metallic cultural heritage, developing a portable equipment for *in-situ* measurements.

This communication presents CREMEL II (“Conservation-restoration of metallic cultural heritage by electrochemical techniques: research and application”), in which an interdisciplinary research group tackles the extension of the application of previous developments to specific collections of metallic cultural heritage (outdoor and indoor sculpture, contemporary art, cecographic plates, etc.), in a systematic way and performing a follow up over time.

Keywords: Conservation, restoration, electrochemistry, cultural heritage, museums, metal.

Introducción

Como ocurre en otros sectores, el principal problema que afecta al patrimonio cultural metálico es la corrosión. Este fenómeno provoca importantes pérdidas económicas, pero en el caso del patrimonio cultural metálico, el deterioro no implica solo una pérdida económica, ya que se trata de piezas únicas e irremplazables que forman parte de nuestra historia y nuestra cultura y que, igual que han llegado a nosotros desde el pasado, debemos conservar para generaciones futuras.

La corrosión es un proceso inevitable; sin embargo, lo que determina en la práctica sus efectos es la velocidad a la que se produce. Así, aunque los objetos metálicos se van recubriendo con el tiempo de una capa de productos de corrosión, esta puede ser más o menos estable, avanzando rápidamente o no, en función de su composición, estructura y medio en que se encuentra. En el caso del cobre y sus aleaciones (bronce y latón, principalmente) o de los llamados aceros patinables, estas capas tienen una cierta capacidad protectora y una importante función estética, por lo que se les suele aplicar el término «pátina». La formación y estabilización de las pátinas es un proceso muy lento y depende fuertemente del medio al que esté expuesto el metal, y por ello no todas las pátinas presentan la misma capacidad protectora que además puede verse modificada con el tiempo. Además de la protección natural que pueda ofrecer una pátina, para asegurar la preservación de este tipo de patrimonio cultural frecuentemente es necesario el empleo de recubrimientos y/o inhibidores de corrosión. Así pues, el conocimiento de las propiedades protectoras de pátinas y recubrimientos y de su evolución o degradación con el tiempo es un aspecto clave a la hora de diseñar una estrategia para la conservación del patrimonio cultural metálico, y para ello resulta fundamental contar con herramientas de diagnóstico eficaces.

La mayor parte de los estudios de envejecimiento de los materiales se llevan cabo mediante técnicas aceleradas o bien se limitan a unos pocos años de duración. Esto proporciona una información insuficiente, especialmente en el caso de los objetos que forman parte de nuestro patrimonio, cuya vida deseamos extender en el tiempo. Por otra parte, existen diversos estudios detallados pero limitados a una obra o a lo sumo a un conjunto representativo, pero generalmente no se abordan estudios en un contexto espacial o temporal más amplio.

Dado que el proceso de corrosión de los objetos metálicos es electroquímico, «se puede estudiar o controlar estudiando o controlando las magnitudes eléctricas que intervienen. Es decir, mediante técnicas electroquímicas» (Cano *et al.*, 2015: 269). Así, técnicas no destructivas como la resistencia de polarización (R_p) o la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) nos permiten analizar la capacidad protectora de diferentes recubrimientos y seguir su evolución a lo largo del tiempo, siendo esta última la técnica más utilizada y la que más infor-

mación proporciona en el estudio del comportamiento electroquímico de superficies y recubrimientos.

La EIS se basa en la aplicación de una pequeña señal sinusoidal de corriente alterna y la medida de la respuesta del sistema en intensidad. La relación entre la señal y la respuesta en un intervalo de frecuencias (típicamente 100 kHz-10 mHz) proporciona un espectro de impedancia cuyo perfil nos permite separar las contribuciones de distintos elementos que intervienen en el proceso de corrosión. Con ello se obtiene no solo una cuantificación de la protección proporcionada, sino también información sobre los mecanismos involucrados en el proceso y su evolución con el tiempo. La EIS permite medir superficies con una alta impedancia, y es por lo tanto especialmente adecuada para estudiar recubrimientos orgánicos sobre metales (pinturas, barnices, etc.) o pátinas gruesas.

Particularidades de la aplicación de técnicas electroquímicas en patrimonio cultural

A pesar de su amplia difusión en otros ámbitos y de las ventajas que proporciona, la EIS ha sido relativamente poco utilizada en el estudio del patrimonio cultural metálico. Las razones para ello hay que buscarlas fundamentalmente en las peculiaridades de los ensayos sobre patrimonio cultural.

La variedad y complejidad de objetos, condicionada tanto por su origen como por su historia, hace que reproducir sus características y su entorno en el laboratorio para la realización de ensayos controlados sea una tarea imposible, haciéndose necesario realizar las medidas sobre la obra real.

Por otro lado, a la hora de realizar medidas directas sobre las obras surgen nuevas dificultades. Por un lado, la imposibilidad de trasladar los objetos al laboratorio hace necesario realizar las medidas *in situ*, por lo que ya desde los inicios del empleo de la EIS en patrimonio los investigadores comenzaron a desarrollar sistemas portátiles y ahí es donde surge el reto de cómo poner en contacto un electrolito líquido para medir sobre una superficie irregular y no siempre horizontal. Además, esta irregularidad de las superficies de medida se traduce en una distorsión en los espectros, que son difíciles de interpretar. Esto hace que la mayoría de los estudios se limiten a evaluar el módulo de la impedancia a altas frecuencias relacionándolo con la resistencia de la pátina o el recubrimiento, obviando el resto de la información proporcionada por el análisis. Con diferentes enfoques, en los últimos años se ha desarrollado un número notable de trabajos de aplicación de EIS y otras técnicas electroquímicas para la evaluación de recubrimientos protectores para patrimonio metálico (Angelini *et al.*, 2010; Cano *et al.*, 2010; Swartz y Clare, 2015; Swartz *et al.*, 2012). Además, algunos autores han utilizado técnicas electroquímicas *ex situ* para el estudio de muestras de pátinas tomadas de monumentos (Chiavari *et al.*, 2007) o sintetizadas artificialmente (Rahmouni *et al.*, 2009), o para la monitorización de tratamientos de estabilización de piezas arqueológicas (Doménech-Carbó *et al.*, 2012; Doménech-Carbó *et al.*, 2014).

El proyecto CREMEL: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento

El proyecto que aquí se presenta es continuación del proyecto CREMEL («Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento») financiado en la convocatoria 2011 de ayudas a Proyectos de Inves-

tigación Fundamental no Orientada del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, Ref. HAR2011-22402. En este proyecto se abordó el desarrollo de metodologías electroquímicas específicamente adaptadas a los requerimientos de la conservación y restauración del patrimonio cultural metálico (Cano, 2015).

En el proyecto CREMEL se trabajó en dos líneas complementarias pero diferenciadas: por un lado, en la aplicación de técnicas electroquímicas como herramienta para el tratamiento, centrándose en su aplicación sobre plata (figura 1) y plomo (Palomar *et al.*, 2014; Palomar *et al.*, 2016; Palomar, 2016); y por otro, en el desarrollo de una metodología especialmente adaptada para la realización de medidas *in situ* en patrimonio metálico. Dentro de esta línea, se ha desarrollado y puesto a punto una celda electroquímica con un principio y diseño tradicional (tres electrodos), pero utilizando un electrólito gelificado con agar. A lo largo del proyecto se trabajó en el diseño y mejora de un prototipo y en su aplicación al estudio de probetas de laboratorio y obra real. El sistema de electrólito (agua de lluvia artificial)-gelificante (agar) utilizado ha demostrado cumplir con las necesidades de las medidas, siendo no agresivo para las

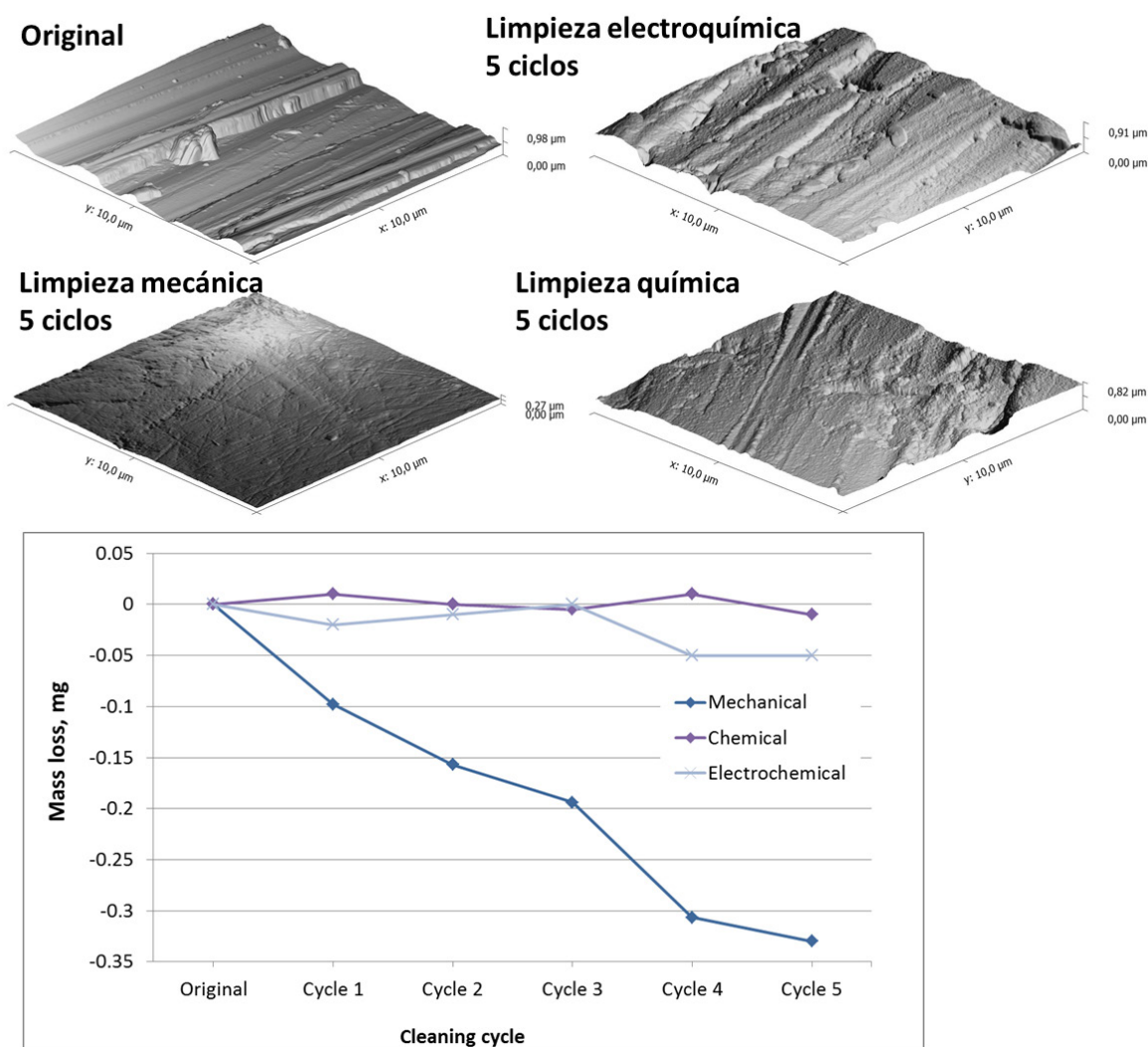


Figura 1. Estudio superficial por microscopía de fuerza atómica (AFM) de probetas de plata con distintos tratamientos de limpieza y evaluación de la pérdida de masa tras limpiezas sucesivas.

obras y permitiendo la obtención de espectros de EIS y medidas R_p de calidad aceptable. Con este diseño se han podido evaluar diferentes pátinas, recubrimientos y también se ha empleado con éxito en el seguimiento del proceso de restauración de las esfinges de la fachada del Museo Arqueológico Nacional de Madrid (Cano *et al.*, 2014; Ramírez Barat y Cano, 2015; Ramírez Barat *et al.*, 2017).

El proyecto CREMEL II: investigación y aplicación

Partiendo de los desarrollos del proyecto CREMEL, el grupo de investigación propone avanzar más allá, pasando a realizar una aplicación sistemática en paralelo, por un lado, en probetas de laboratorio, y por otro, en piezas y colecciones reales, en colaboración estrecha con conservadores y restauradores de las obras y con un seguimiento a lo largo del tiempo.

CREMEL II se enfoca a sentar las bases, recopilar la información de partida y la generada durante la extensión temporal del proyecto, y establecer una metodología para el seguimiento de diferentes colecciones del patrimonio metálico.

Como continuación de la labor previa se plantea este proyecto, en el que, con la participación de un grupo interdisciplinar de investigadores, se aborda la extensión de la aplicación de los desarrollos previos en colecciones específicas de patrimonio cultural metálico (escultura en exterior y en interior, arte contemporáneo, planchas calcográficas, etc.), de manera sistemática y realizando un seguimiento a lo largo del tiempo. Se pretende en este proyecto:

- Adquirir una amplia serie de resultados electroquímicos que sirvan de referencia para distintos materiales, estados de conservación, tratamientos aplicados, etc.
- Conocer la evolución a lo largo del tiempo de las pátinas y recubrimientos en los distintos medios y condiciones en los que se conservan los bienes culturales metálicos.
- Establecer indicadores en los ensayos electroquímicos que permitan anticipar el fallo de los sistemas de protección de manera temprana (antes de que el proceso de corrosión sea visible y, por lo tanto, el daño irreversible), permitiendo con ello que las actuaciones de conservación curativa se puedan optimizar en el tiempo y en los materiales.
- Trabajar conjuntamente con los conservadores-restauradores de metal para integrar esta metodología en su tarea, de manera que, por un lado, se pueda dar respuesta a ciertos interrogantes que surgen en actividad diaria, y por otro, que las demandas y necesidades reales puedan orientar los desarrollos y evolución futura de esta metodología.

De manera general, el objetivo de este proyecto es lograr una mejor protección y preservación del patrimonio cultural metálico por medio de una investigación aplicada y en colaboración con los conservadores-restauradores, de tal forma que tenga una incidencia directa en la práctica de la conservación. De manera más específica, se pretende, por medio de la identificación temprana de «indicadores de deterioro» por técnicas electroquímicas, que los tratamientos de limpieza y protección de los objetos metálicos se puedan optimizar en el tiempo y en los materiales, contribuyendo con ello a mejorar la sostenibilidad de la tarea, tan costosa como necesaria, de preservar nuestro patrimonio cultural.

Primeros resultados

Aunque CREMEL II es aún un proyecto en marcha, se han comenzado a obtener resultados interesantes, algunos de los cuales se presentan aquí de manera preliminar en relación con los objetivos previamente expuestos.

Aunque se continúa trabajando con bronce (con pátinas naturales y artificiales), como material por excelencia de la escultura al aire libre, se ha comenzado a estudiar y aplicar las técnicas electroquímicas para la caracterización de pátinas naturales y artificiales sobre acero patinable (más conocido por la marca comercial Cor-Ten), al ser un material muy relevante en escultura y arquitectura contemporánea. Este acero presenta la propiedad de protegerse de manera natural por exposición a la intemperie (con ciclos de humectación y secado), formándose una pátina de herrumbre protectora y estéticamente apreciada. Sin embargo, en usos artísticos es habitual acelerar la formación de las pátinas por distintos tratamientos químicos, lo que puede comprometer la capacidad protectora de la misma y, por lo tanto, su conservación. Los resultados obtenidos han demostrado que, aunque estéticamente puedan ser aceptables, las pátinas artificiales recién formadas no protegen frente a la corrosión como una pátina natural del largo tiempo (Crespo, 2016). Se está realizando un seguimiento de la evolución de las mismas una vez expuestas al exterior, y si bien parecen mejorar su capacidad protectora tras un año de exposición, aún están lejos de las propiedades de una pátina natural (figura 2).

Se ha continuado midiendo la evolución con el tiempo de la protección aplicada en la restauración de las esfinges del Museo Arqueológico Nacional, para monitorizar la pérdida de capacidad protectora con el tiempo. Los resultados obtenidos han permitido observar la progresiva pérdida de propiedades del recubrimiento acrílico aplicado, y –de manera aproximada– estimar la vida útil del mismo en unos 4-5 años, antes de lo cual sería necesario intervenir de nuevo para asegurar la adecuada conservación de las obras (Ramírez Barat *et al.*, 2017).

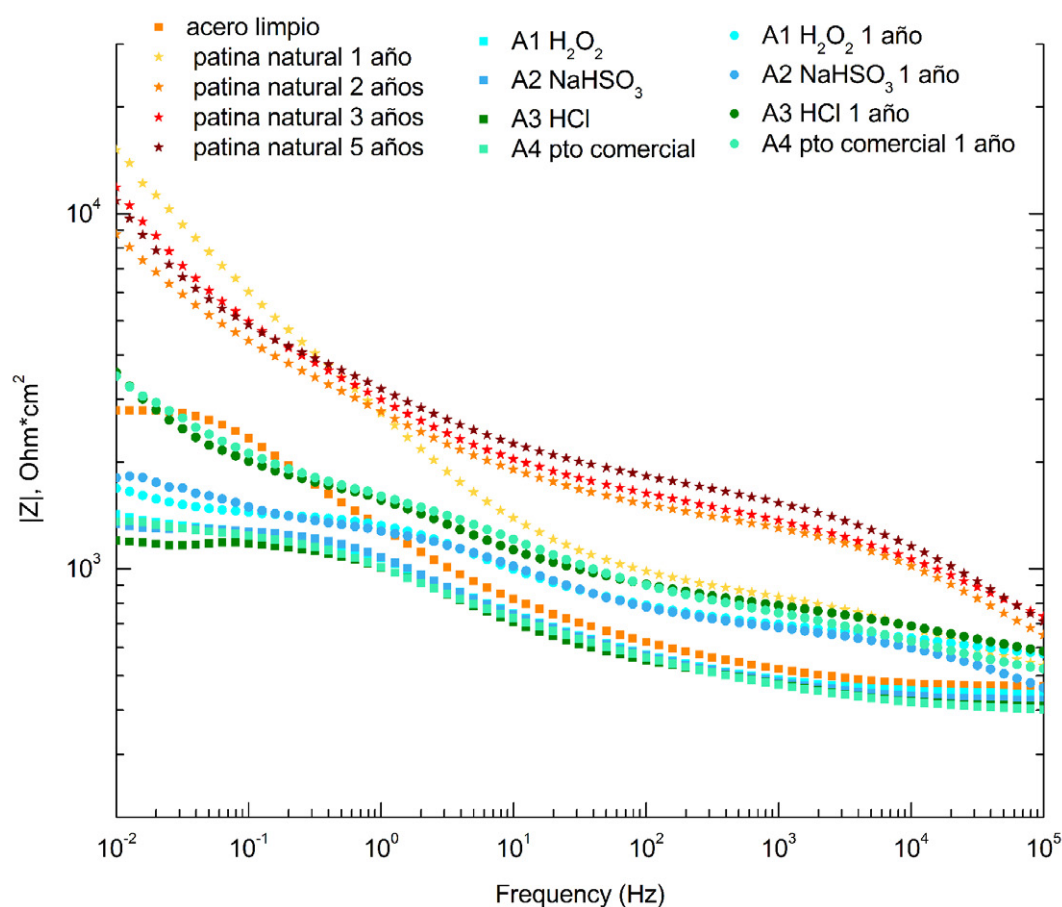


Figura 2. Evaluación de la capacidad protectora de pátinas artificiales y naturales sobre acero Cor-Ten. Representación del módulo de impedancia para diferentes pátinas.

Se están realizando, así mismo, medidas en objetos históricos de otros materiales, como planchas calcográficas de cobre conservadas en el Real Jardín Botánico, con el objetivo de cuantificar la capacidad protectora de los recubrimientos que las protegen (figura 3).

Todos los trabajos en obra real se realizan en colaboración con los conservadores-restauradores, tanto los que participan en el proyecto (del IPCE, Real Jardín Botánico y Museo Oteiza), como con los responsables de las colecciones con las que se está trabajando, especialmente del Museo de Escultura de Leganés y del Museo Reina Sofía. El diálogo continuo permite, por un lado, enfocar y reorientar las investigaciones según las necesidades reales de las obras, y por otro, una transferencia directa del conocimiento que se genera a los usuarios directos de los mismos, los conservadores-restauradores.



Figura 3. Realización de medidas de impedancia sobre una plancha de grabado de la colección del Real Jardín Botánico.

Bibliografía

- ANGELINI, E.; GRASSINI, S., y PARVIS, M. (2010): «Silver artefacts: Plasma deposition of SiO_x protective layers and tarnishing evolution assessment». *Corrosion Engineering Science and Technology*, 4: 334-340.
- CANO, E.; LAFUENTE, D., y BASTIDAS, D. M. (2010): «Use of EIS for the evaluation of the protective properties of coatings for metallic cultural heritage: A review». *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14: 453-463.
- CANO, E.; LAFUENTE, D.; RAMÍREZ BARAT, B.; PÉREZ, J.; FLORES, LL.; MARTÍNEZ, I.; TRAVER, I.; FERRAZZA, L.; DÍAZ, S.; GARCÍA, E.; MARTÍN, E., y LETARDI, P. (2013): «Quantitative evaluation of the effect of electrochemical cleaning of silver artifacts». METAL 2013. International Conference on Metal Conservation. Edimburgo, Escocia.
- CANO, E.; CRESPO, A.; LAFUENTE, D., y RAMÍREZ BARAT, B. (2014): «A novel gel polymer electrolyte cell for in-situ application of corrosion electrochemical techniques». *Electrochemistry Communications*, 41: 16-19.
- CANO, E., *et al.* (2015): «Conservación-restauración del patrimonio cultural metálico por técnicas electroquímicas: desarrollo de una metodología específica adaptada al diagnóstico y tratamiento (CREMEL)». En *La Ciencia y el Arte V. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio*. Madrid: Secretaría General Técnica. Centro de Publicaciones. MECD, pp. 268-272.
- CHIAVARI, C.; RAHMOUNI, K.; TAKENOUTI, H.; JOIRET, S.; VERMAUT, P., y ROBBIOLO, L. (2007): «Composition and electrochemical properties of natural patinas of outdoor bronze monuments». *Electrochimica Acta*, 52: 7760-7769.
- CRESPO, A.; RAMÍREZ-BARAT, B., y CANO, E. (2016) «Artificial patinas in contemporary weathering steel sculpture». *5th international conference YOUTH in CONSERVATION OF CULTURAL HERITAGE (YOCO-CU 2016)*. Madrid: Museo Reina Sofía (en prensa).
- DOMÉNECH-CARBÓ, A.; DOMÉNECH-CARBÓ, M. T.; PEIRÓ-RONDA, M. A.; MARTÍNEZ-LÁZARO, I., y BARRIO-MARTÍN, J. (2012): «Application of the voltammetry of microparticles for dating archaeological lead using polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy». *Journal of Solid State Electrochemistry*, 16: 2349-2356.
- DOMÉNECH-CARBÓ, A.; LASTRAS, M.; RODRÍGUEZ, F.; CANO, E.; PIQUERO-CILLA, J., y OSETE-CORTINA, L. (2014): «Monitoring stabilizing procedures of archaeological iron using electrochemical impedance spectroscopy». *Journal of Solid State Electrochemistry*, 18: 399-409.
- PALOMAR, T.; RAMÍREZ BARAT, B.; DÍAZ, S.; GARCÍA, E.; LAFUENTE, D., y CANO, E. (2014): «Impact assessment of different cleaning methods for tarnished silver artefacts». En M. A. ROGERIO, *Science, Technology and Cultural Heritage*. Ed. Leiden: CRC Press, pp. 323-328.
- PALOMAR, T.; RAMÍREZ-BARAT, B.; GARCÍA, E., y CANO, E. (2016): «A comparative study of cleaning methods for tarnished silver». *Journal of Cultural Heritage*, 17: 20-26.
- PALOMAR, T. (2016): «Evaluación de métodos de limpieza para la conservación del patrimonio cultural en plomo». Trabajo Fin de Master. Universidad Pablo de Olavide.
- RAHMOUNI, K.; TAKENOUTI, H.; HAJJAJI, N.; SRHIRI, A., y ROBBIOLO, L. (2009): «Protection of ancient and historic bronzes by triazole derivatives». *Electrochimica Acta*, 54: 5206-5215.
- RAMÍREZ-BARAT, B., y CANO, E. (2015): «The use of agar gelled electrolyte for in situ electrochemical measurements on metallic cultural heritage». *Electrochimica Acta*, 182: 751-762.

- RAMÍREZ BARAT, B.; CRESPO, A.; GARCÍA, E.; DÍAZ, S., y CANO, E. (2017): «An EIS study of the conservation process of the bronze sphinxes at the Museo Arqueológico Nacional (Madrid)». *Journal of Cultural Heritage*, 24: 93-99.
- SWARTZ, N., y CLARE, T. L. (2015): «On the protective nature of wax coatings for culturally significant outdoor metalworks: Microstructural flaws, oxidative changes, and barrier properties». *Journal of the American Institute for Conservation*, 54: 181-201.
- SWARTZ, N. A.; WOOD, K. A., y CLARE, T. L. (2012): «Characterizing and improving performance properties of thin solid films produced by weatherable water-borne colloidal suspensions on bronze substrates». *Progress in Organic Coatings*, 75: 215-223.

El proyecto de reconstrucción virtual de la ciudad ibérica de Ullastret

Ferran Codina

Museu d'Arqueologia de Catalunya-Ullastret
fcodinafalgas@gmail.com

Gabriel de Prado

Museu d'Arqueologia de Catalunya-Ullastret
gdeprado@gencat.cat

Isis Ruiz

Agència Catalana del Patrimoni Cultural
isruiz@gencat.cat

Albert Sierra

Agència Catalana del Patrimoni Cultural
asierra@gencat.cat

Resumen: En este artículo presentamos una síntesis del proceso de trabajo desarrollado por un equipo multidisciplinar para realizar una reconstrucción virtual en 3D de la ciudad ibérica de Ullastret, un importante conjunto arqueológico de la Edad del Hierro situado en el noreste peninsular.

Asimismo, se presentan y analizan las aplicaciones derivadas de esta reconstrucción virtual. Por un lado, se ha creado una sala de proyección inmersiva multipantalla en la sede de Ullastret del Museu d'Arqueologia de Catalunya, donde se puede visualizar de manera colectiva un audiovisual creado a partir del modelo tridimensional del conjunto. Por otro lado, este audiovisual se ha adaptado como una experiencia hiperrealista para el modelo de gafas de realidad virtual HTC Vive.

Estas y otras aplicaciones que se están conceptualizando y desarrollando a partir de esta reconstrucción constituyen una herramienta extremadamente útil para mejorar la comprensión, divulgación y puesta en valor de este conjunto arqueológico¹.

Palabras clave: Ciudad ibérica, reconstrucción virtual, sala inmersiva, realidad virtual, dispositivos VR.

Abstract: In this paper we present a synthesis of the process of the work developed by a multidisciplinary team to perform a virtual 3D reconstruction of the Iberian town of Ullastret, an important Iron Age settlement located in the northeast of the Iberian Peninsula, that belongs to the Museu d'Arqueologia de Catalunya.

¹ Este proyecto se ha desarrollado en el marco del programa *Patrimoni en Acció* que es fruto de un acuerdo de colaboración entre el Departamento de Cultura de la Generalitat de Catalunya y la Obra Social «La Caixa», con la voluntad de facilitar a toda la ciudadanía el acceso al patrimonio cultural catalán mediante la creación de herramientas que ayuden a su comprensión y disfrute.

Likewise, derivative applications of this virtual reconstruction are presented and analysed. From one side, an immersive multi-screen room has been created in the Museum of Ullastret, where an audiovisual created after the tridimensional model of the settlement can be seen collectively. On the other side the 3D model has been adapted to be seen as a hyperrealist experience with the virtual reality glasses HTC Vive.

This and other applications that are being conceptualized and developed from this reconstruction constitute an extremely useful tool to improve the comprehension, divulgation and valorisation of this archaeological site.

Keywords: Iberian town, virtual reconstruction, immersive room, virtual reality, VR devices.

Introducción

La ciudad ibérica de Ullastret, siglos VI-II a. C., se encuentra en la actual llanura del Ampurdán (Gerona) y constituye uno de los conjuntos arqueológicos de la Edad del Hierro más conocidos y destacados del Mediterráneo noroccidental. Esta gran aglomeración urbana estaba formada por dos núcleos de hábitat, el Puig de Sant Andreu y la Illa d'en Reixac, que estaban separados entre sí por tan solo 300 m (figura 1). Ambos asentamientos llegaron a ocupar, conjuntamente, una extensión *intramuros* superior a 15 hectáreas y constituyeron la capital de la tribu ibérica de los indigetes o indiketes que aparece citada por algunos autores clásicos como Avieno, Ptolomeo y Estrabón.

El conjunto fue descubierto, a nivel científico, a inicios de los años treinta del siglo pasado y, después de una primera excavación arqueológica en 1947, a partir de 1952 se desarrollan intervenciones arqueológicas de manera continuada y sistemática. No obstante, son las investigaciones llevadas a cabo estos últimos años, basadas en muchos casos en la aplicación de técnicas de prospección geofísica de última generación (Codina *et al.*, 2015; García-García, Prado y Principal, 2016) (figura 2), las que han logrado alcanzar un alto grado de conocimiento de su estructura urbana y defensiva, así como de su territorio circundante (Codina, Martín, y Prado, 2012). Esto nos ha permitido plantear y promover un proyecto de reconstrucción virtual en 3D de todo el conjunto partiendo de una base de conocimiento científica muy sólida que, a su vez, ha aprovechado los importantes avances en el estudio de la cultura ibérica obtenidos en los últimos años.

La reconstrucción está basada en un momento concreto de la historia de la ciudad, entorno al 250 a. C., puesto que es el período mejor conocido a nivel científico y ello permite una aproximación más ajustada a la realidad. Aunque hubiera sido interesante poder hacer una secuencia que incluyera de alguna manera fases precedentes, estas se conocen de manera muy parcial y hubiera sido muy complicado definir aspectos básicos para la restitución virtual como, por ejemplo, la propia estructura urbana del asentamiento.



Figura 1. Vista aérea de los asentamientos que conforman la ciudad ibérica de Ullastret.



Figura 2. Proceso de trabajo y resultado de las prospecciones geofísicas realizadas por Eastern Atlas en Ullastret el año 2012 (extraído de *Monografies d'Ullastret*, 3, 2016).

Para desarrollar el proyecto se constituyó un equipo multidisciplinar, dirigido desde la sede de Ullastret del Museu d'Arqueologia de Catalunya y coordinado a nivel técnico desde la Agència Catalana del Patrimoni Cultural, que ha trabajado conjuntamente con un estudio de diseño gráfico y modelización 3D. Además, también ha colaborado un gran número de especialistas en diferentes materias (arquitectos, antropólogos, hidrogeólogos, especialistas en arquitectura naval, etc.) con la voluntad de definir con la máxima precisión y detalle los múltiples aspectos que se han tenido que contemplar para hacer esta reconstrucción con el máximo rigor científico.

El proceso de reconstrucción virtual

El primer paso para iniciar la reconstrucción se ha fundamentado en una exhaustiva recopilación de toda la información arqueológica disponible. No obstante, hay que ser conscientes de que en determinadas cuestiones hemos tenido que basarnos en modelos comparativos, teóricos y/o experimentales, en algunos casos no contrastados arqueológicamente, que constituyen hipótesis bien fundamentadas pero siempre sujetas a futuras revisiones. Por ello, además de compilar los datos arqueológicos interpretados, uno de los trabajos importantes de esta primera fase ha sido el de consensuar cómo se debía recrear aquello que no existe desde un punto de vista que podríamos considerar tangible.

Una vez que estos datos eran validados desde el punto de vista científico, se estructuraban a nivel temático y se trasvasaban al estudio encargado de la modelización y texturización virtual en 3D siguiendo una secuencia de trabajo preestablecida. En este sentido, el primer elemento trabajado fue la estructura geomorfológica de los asentamientos y el paleopaisaje, puesto que era fundamental contextualizar la ciudad en su entorno geográfico. Para modelar el paisaje se tuvo muy en cuenta la vegetación existente en aquel periodo y, especialmente, la acción transformadora ejercida por el hombre a través de la creación de vías de comunicación, la explotación agrícola, la extracción de recursos minerales, etc. Seguidamente, se incidió en la propia estructura de la ciudad, primero a partir de la recreación de las construcciones defensivas (muralla y foso) y posteriormente a partir del entramado urbano, definiendo calles y levantando volumétricamente y de manera individualizada los diferentes tipos de construcciones y edificios que configuraban la ciudad. Finalmente, se reconstruyeron e incorporaron elementos muebles del interior de los edificios así como otro tipo de artefactos, basándonos en los objetos de la cultura material hallados en las excavaciones y conservados en los fondos del museo monográfico de Ullastret. Asimismo se han reconstruido, a partir de un trabajo a nivel comparativo, aquellos elementos que por su naturaleza orgánica no habían sido encontrados arqueológicamente, aunque sabemos, a través de indicios indirectos, que efectivamente existían.

Técnicamente, el modelo se ha construido a partir de la base cartográfica 3D del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya que permite generar una malla geométrica para representar el relieve, introduciendo en este caso el antiguo lago de Ullastret que fue desecado en el siglo XIX. También se han utilizado, de manera complementaria, los levantamientos topográficos realizados en el conjunto arqueológico estos últimos años. A partir de aquí se crearon esbozos tridimensionales utilizando las aplicaciones Cinema4D y 3D Studio Max, básicamente, para la arquitectura (figura 3). Para el tratamiento de los objetos, mayoritariamente, a partir del dibujo vectorizado se exporta a un formato 3D en los mismos programas y se genera el modelo, añadiéndole textura y color. Una vez creados estos, una de las particularidades del proyecto ha sido que no se han utilizado las herramientas informáticas habituales en el mundo de la arquitectura o la arqueología, sino que para la construcción de la orografía y el paisaje, así como para la etapa final del proceso de reconstrucción virtual, se optó por utilizar Unreal

Engine 4. Este es un motor de desarrollo de videojuegos que destaca por su gran potencial en la creación de entornos paisajísticos y por la calidad gráfica fotorrealista que consigue dar a las imágenes, en este caso mediante texturas creadas a partir de fotografías de elementos reales. También permite exportar el proyecto, de manera relativamente sencilla, a entornos virtuales inmersivos como las proyecciones multipantalla, vídeo 360° y especialmente para gafas de realidad virtual.

Los modelos que se iban creando virtualmente eran chequeados a nivel científico durante todo el proceso de trabajo desde una fase inicial (figura 3), en la cual simplemente se reproducían a nivel volumétrico, hasta la consecución de la imagen hiperrealista final (figura 4). Este desarrollo ha permitido ir introduciendo las correcciones oportunas que, en algunos casos, han obligado a modificar de manera importante algunos elementos erróneos que partían de ideas preconcebidas que habían sido ampliamente aceptadas y divulgadas.



Figura 3. Ejemplo de modelos virtuales durante el proceso de trabajo de reconstrucción en las fases preliminares. Imagen: Burzon*Comenge Creative Studio.



Figura 4. Imágenes del resultado de la reconstrucción después de recrear la volumetría y añadir la texturización de los elementos.

Aplicaciones prácticas de la modelización virtual

Después de casi un año y medio de intenso trabajo, la primera fase del proyecto se cerró con la creación y divulgación, a través de redes sociales, de un vídeo con imágenes en movimiento de la ciudad ibérica reconstruida. No obstante, el objetivo de modelización no se limitaba a la creación de esta representación visual sino que, después de valorar diferentes opciones técnicas y económicas, se decidió desarrollar dos aplicaciones prácticas: una sala inmersiva donde proyectar un audiovisual con la reconstrucción virtual y su adaptación para gafas de

realidad virtual. No obstante, también se está trabajando en otras posibles aplicaciones, algunas de ellas en la línea de ofrecer nuevos e innovadores recursos pedagógicos al mundo educativo.

La sala inmersiva

Esta sala está inspirada en el concepto tecnológico CAVE (*Cave Assisted Virtual Environment*), utilizado desde hace algunos años en algunos museos (Barceló, 2001; Pujol, 2004), y en el más reciente *magic box*, cuyo ejemplo práctico más conocido es el *State Grid Pavilion* de la Exposición Universal de Shanghai 2010. Ambos sistemas se basan en la creación de una sala de proyección audiovisual concebida para crear una experiencia inmersiva de realidad virtual que se puede visionar de manera colectiva.

En el proyecto desarrollado en la sede de Ullastret del Museu d'Arqueologia de Catalunya se trata de una proyección multipantalla, visible en tres de las cuatro paredes de la sala, que se acompaña de un sistema de audio tridimensional sincronizado con el movimiento de las imágenes, creando un efecto envolvente alrededor del espectador. En este sentido, el sonido ha sido muy trabajado para conseguir texturas sonoras que acompañan los diferentes espacios virtuales que aparecen en la proyección.

La sala dispone de una superficie aproximada de 10 m² con la voluntad de reproducir, de la manera más cercana posible, las dimensiones y características de una habitación de una vivienda íbera común como las que aparecen en el audiovisual que se proyecta (figura 5). Para ello también se ha pensado en el pavimento, que ha sido realizado en caucho reciclado extendido, simulando el suelo de tierra de las estancias y calles de la ciudad íbera. Además, este material tiene propiedades que, junto al tratamiento técnico de paredes y techo, consiguen optimizar las características de la sala desde un punto de vista acústico.

En la sala se proyecta un audiovisual, con una duración de seis minutos, creado íntegramente a partir del modelo digital a través de un recorrido filmado por cámaras virtuales. Argumentalmente el espectador hace un viaje onírico a la ciudad ibérica, paseando por sus calles y casas vacías. La historia está narrada por un antiguo habitante, perteneciente a las élites, que recuerda momentos dramáticos vividos en su ciudad. En este sentido, el concepto y estructura narrativa intentan alejarse del tradicional audiovisual descriptivo y de un perfil lineal que explica el yacimiento y lo contextualiza. Para ese objetivo, el MAC-Ullastret ya dispone de un servicio de audioguías y también de una aplicación móvil que permiten al visitante recorrer el yacimiento y conocer las informaciones básicas relativas al conjunto arqueológico. De esta manera, el audiovisual se concibe como un complemento y una herramienta especialmente útil para contribuir al conocimiento y la interpretación de este patrimonio.

Realidad virtual a través de dispositivos VR

Mediante el trabajo conjunto con una empresa de desarrollo tecnológico se ha adaptado el audiovisual creado para la sala inmersiva, posibilitando una versión para gafas HTC Vive. Estos dispositivos, a diferencia de la sala, permiten una inmersión completa y absolutamente realista en la cual el individuo puede navegar dentro del espacio virtual de manera natural y a una escala real (figura 6). En este caso la experiencia, dentro de unos límites, permite una cierta interacción con el entorno virtual de manera que nunca dos usuarios experimentarán una visualización idéntica.

Esta aplicación para este dispositivo VR no está concebida para estar disponible de manera permanente en el propio museo, puesto que el concepto inicial es idéntico al de la sala y, aunque la experiencia se percibe de manera diferente y más inmersiva, estaríamos duplicando un mismo recurso. Además, la gestión de las gafas, tal como está concebida actualmente la aplicación, requiere para su uso público de unos recursos de espacio y personal que son difícilmente asumibles actualmente por la mayoría de museos. Por ese motivo, hasta ahora, esta aplicación solo ha estado disponible en congresos especializados (Arqueológica 2.0, Valencia; Archeovirtual, Paestum, Italia, etc.) o en actividades de divulgación del patrimonio cultural (*La Noche de los Museos*, Barcelona; *Fin de semana íbero*, Ullastret, etc.).



Figura 5. Vista general de la sala inmersiva donde se proyecta un audiovisual producido a partir de la reconstrucción virtual.



Figura 6. Visualización del audiovisual basado en la reconstrucción virtual a través de gafas VR HTC Vive.

Conclusiones

El proyecto de reconstrucción virtual de la ciudad ibérica de Ullastret se basa en una exhaustiva investigación arqueológica que intenta preservar la rigurosidad histórica en todo el proceso. Este aspecto es fundamental si se quiere construir una aplicación práctica basada en un conocimiento científico sólido y contrastado. En su desarrollo nos hemos inspirado en los consejos que emanan de la *Carta de Londres*, que establece una serie de principios para el uso de los métodos y de los resultados de la visualización tridimensional en el campo de la investigación y divulgación del patrimonio cultural (<http://www.londoncharter.org/>).

Podríamos considerar que el objetivo principal del proyecto ha sido el de crear un modelo virtual, a partir del cual poder generar herramientas que contribuyan al conocimiento, la divulgación y al uso educativo de este importante complejo arqueológico. No obstante, hay otros objetivos y resultados que se revelan igualmente importantes, como son la contribución a la investigación y el apoyo a la preservación de este patrimonio.

Efectivamente, el propio desarrollo del proyecto constituye una contribución inestimable para la investigación arqueológica del sitio, puesto que permite confrontar, validar o rechazar hipótesis de trabajo que son visualizadas ahora de manera tridimensional. Otro aspecto igualmente estimable es la utilización de la reconstrucción virtual en el marco estratégico de conservación y preservación del conjunto arqueológico. Es evidente que, en muchos casos, disponer de un modelo virtual evita forzar las reconstrucciones interpretativas en los yacimientos, permitiendo así aplicar criterios de mínima intervención. La inteligibilidad y comprensión de los restos ya no se basa fundamentalmente en la contemplación directa de los mismos, puesto que ahora disponemos de herramientas que nos permiten un acercamiento a la realidad más completo e inocuo.

Bibliografía

- BARCELÓ, J. A. (2001): «Virtual reality for archaeological explanation beyond “picturesque” reconstruction». *Archeologia e Calcolatori*, 12, pp. 221-244.
- CODINA, F.; GARCÍA-GARCÍA, E.; MARTÍN, A.; PRADO, G. DE; SALA, R., y TAMBA, R. (2015): «Metodologia de treball i resultats preliminars de la prospecció geofísica multisistema realitzada a l'illa d'en Reixac (Ullastret, Baix Empordà)» [en línea]. *Tribuna d'Arqueologia*, 2012-2013, pp. 236-243. Disponible en: <<http://calaix.gencat.cat/handle/10687/123243>> [consulta: 17 de noviembre de 2016].
- CODINA, F.; MARTÍN, A., y PRADO, G. DE (2012): «La recerca arqueològica al conjunt ibèric d'Ullastret en els darrers anys (1995-2010)». *Tribuna d'Arqueologia*, 2010-2011, pp. 63-99.
- GARCÍA-GARCÍA, E.; PRADO, G. de, y PRINCIPAL, J. (eds.) (2016): «Working with buried remains at Ullastret (Catalonia)». Proceedings of the 1st MAC International Workshop of Archaeological Geophysics. Ullastret: Museu d'Arqueologia de Catalunya-Ullastret (*Monografies d'Ullastret*, 3).
- London Charter for the computer-based visualisation of cultural Heritage* [en línea]. Disponible en: <<http://www.londoncharter.org/>> [consulta: 18 de octubre de 2016].
- PUJOL, L. (2004): «Arqueologia, museus i realitat virtual» [en línea]. *Digithum Revista Digital d'Humanitats UOC*, 6. Disponible en: <<http://www.uoc.edu/humfil/articles/eng/pujol0304/pujol0304.pdf>> [consulta: 12 de noviembre de 2016].

Uso de microfluorescencia de rayos X y otras técnicas nucleares no destructivas para el estudio de joyas y metales arqueológicos

Miguel Ángel Respaldiza

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía
Parque Científico y Tecnológico Cartuja. C/ Thomas A. Edison 7, 41092 Sevilla
Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad de Sevilla
Avda. Reina Mercedes s/n, 41012 Sevilla
respaldiza@us.es.

Simona Scrivano

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía
Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad de Sevilla

Francisco J. Ager

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía
Departamento de Física Aplicada I. Universidad de Sevilla
Virgen de África 7, 41015 Sevilla

Kilian Laclavetine

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía
Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad de Sevilla

Blanca Gómez-Tubío

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía
Departamento de Física Aplicada III. Universidad de Sevilla
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092 Sevilla

Inés Ortega-Feliu

Centro Nacional de Aceleradores (CNA). Universidad de Sevilla. CSIC. Junta de Andalucía

Resumen: Hoy en día, el estudio de objetos antiguos de metal incluye el análisis por medio de métodos físico-químicos no destructivos desarrollados en las décadas pasadas. Uno de los parámetros más importantes que deben conocerse de una muestra es su composición química, ya que esta información contribuye significativamente a la determinación de varias suposiciones y a la respuesta de muchas preguntas que surgen mientras se estudia un objeto de gran valor histórico. La fluorescencia de rayos X es una técnica bien conocida y muy empleada en el análisis elemental de objetos antiguos de metal y el nuevo desarrollo del microhaz focalizado de rayos X descrito en este texto incrementa su adecuación para el estudio de técnicas antiguas de fabricación y decoración. Esta técnica de análisis superficial se complementa con la técnica de transmisión de rayos gamma, que ha sido utilizada para la estimación de la composición en el interior de monedas de plata-cobre y objetos realizados en otras

aleaciones del cobre. Describimos también el sistema de microfluorescencia confocal portátil desarrollado por nuestro Grupo para la obtención de perfiles en profundidad de forma no destructiva.

Abstract: The study of ancient metal artefacts includes nowadays the non-destructive analysis by means of chemical-physical methods developed in the past decades. One of the most important parameters to be known from a sample is its chemical composition, as this information significantly contributes to the determination of several assumptions and to the response of many questions arisen from the study of a valuable heritage object. X-ray fluorescence is a well-known technique very much employed for the elemental analysis of ancient metal artefacts and the new implementation of a microfocused X-ray beam described in this text increases its applicability for the study of manufacture and decorative ancient techniques. This surface analytical method is complemented with the Gamma Ray Transmission technique, which has been employed in the bulk composition estimation of silver-copper coins and other copper based alloy samples. We also describe a portable confocal microfluorescence system developed by our Group to obtain non-destructive depth profiles.

Análisis por microfluorescencia de rayos X

En el estudio de los bienes culturales surgen muy a menudo preguntas que no pueden ser contestadas sin la ayuda de disciplinas que involucren el análisis químico-físico de los materiales, como, por ejemplo, cuestiones acerca del tipo de material que constituye un objeto, su procedencia o su edad. Una de las técnicas analíticas que ha ido popularizándose a partir de los años noventa es la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), gracias al desarrollo de equipos portátiles capaces de proporcionar análisis rápidos y con una elevada sensibilidad.

Como es bien sabido, la fluorescencia de rayos X consiste en la interacción de un haz de rayos gamma o rayos X de alta energía con una muestra a través del efecto fotoeléctrico y la subsecuente desexcitación de los iones de la muestra en forma de rayos X característicos. En efecto, cuando un haz de radiación electromagnética de energía suficiente bombardea una muestra, puede ser absorbido por los átomos de la misma o dispersado a través del material. El proceso en el que un fotón es absorbido por un átomo transfiriéndole toda su energía a un electrón de las capas internas se llama «efecto fotoeléctrico». Durante este proceso, si la radiación primaria tiene suficiente energía, los electrones son eyectados de las capas internas, creándose las consiguientes vacantes. Estas vacantes suponen un estado inestable para el átomo, que vuelve a una situación de estabilidad transfiriendo electrones de orbitales más externos hacia los orbitales internos, emitiéndose la diferencia de energía entre ambos niveles en forma de rayos X característicos del átomo en cuestión. El método de XRF es usado frecuentemente como técnica de análisis elemental y, ya que se trata de un método rápido y no destructivo

para la muestra, es muy utilizado en multitud de aplicaciones interdisciplinares, particularmente en arqueometría.

El desarrollo de la instrumentación portátil para poder efectuar los análisis *in situ* es una característica muy importante en el ámbito arqueométrico, puesto que permite abrir nuevas posibilidades de análisis de objetos que, por sus características intrínsecas o por su valor, no pueden ser trasladados a un laboratorio. Cada día son mayores las restricciones en materia de seguridad en los museos o fundaciones para el traslado de piezas y, por lo tanto, se hace cada vez más complicado acceder a los objetos para estudiarlos. Bajo esta circunstancia, el uso de una técnica de análisis no destructiva y portátil representa, en algunos casos, la diferencia entre la posibilidad de poder analizar, o no, un objeto o un conjunto de objetos de interés histórico-artístico.

En el caso particular del análisis de joyas arqueológicas, dado que estas joyas se caracterizan por decoraciones elaboradas, con detalles de dimensiones típicas de solo algunas decenas de micrómetros, se requiere una alta resolución lateral para estudiar las características de estos objetos. El desafío consiste en la caracterización de las zonas de soldadura y los detalles de las joyas que presentan una geometría muy compleja. Para ello, hemos desarrollado un equipo portátil de micro-XRF en el Centro Nacional de Aceleradores (CNA) que proporciona un microhaz mediante el uso de una lente policapilar. La transmisión del haz de rayos X primario mejora hasta 4000 veces usando una lente policapilar en comparación con un simple colimador que redujera el haz al mismo tamaño en las mismas condiciones geométricas.

Este equipo de micro-XRF portátil consta de un sistema motorizado con tres ejes fabricado por STANDA Ltd. (motores paso a paso con $\sim 1 \mu\text{m}$ de resolución) acoplado a una plataforma horizontal de tres patas telescópicas donde se aloja el cabezal de medida fijo. Esta plataforma permite el fácil posicionamiento de las muestras delante del haz, permitiendo el análisis de objetos grandes. Un sistema de niveles de burbuja fijos en los diferentes ejes del equipo permite comprobar la horizontalidad de la estructura. El cabezal de medida consta de un tubo de rayos X microfoco de baja potencia (30 W) refrigerado por aire (iMOXS, IfG-Institute for Scientific Instruments, Berlín, Alemania) con ánodo de Rh o W (50 kV y 0,6 mA). La salida del tubo de rayos X se puede filtrar con diferentes láminas. La profundidad analítica alcanzada con la configuración micro-XRF depende obviamente de la energía de los rayos X y de la matriz específica bajo análisis, pero para los objetos de oro estudiados se ha estimado que es inferior a 10 micras. De hecho, en el caso de la matriz de oro puro, la profundidad de donde proceden los rayos X de Cu (8,04 keV), Au $L\alpha$ (9,7 keV) y Ag $K\alpha$ (22,1 keV) son 2,5, 4,2 y 8,8 μm (micras), respectivamente. La figura 1 muestra la configuración del equipo de micro-XRF y los detalles del cabezal de medición.

Para la detección de la radiación emitida por la muestra se emplea un detector de deriva de silicio con un área activa de 25 mm^2 , un cristal de 500 μm de espesor y una resolución de aproximadamente 127 eV a 5,9 keV de la línea K de Mn. Un microscopio óptico acoplado con una cámara CCD permite inspeccionar pequeñas áreas (2,5X-10X), mientras que una cámara HD proporciona una vista completa de la muestra, manteniendo un buen nivel de detalle. La distancia de trabajo de aproximadamente 10 mm entre la salida de la lente policapilar y la muestra es controlada por dos microdiodos láser (figura 2). Todos los componentes del espectrómetro se montan en un soporte rígido para crear una geometría fija de excitación/detección XRF de $90^\circ/45^\circ$ que garantiza una buena estabilidad. El tubo de rayos X se hace funcionar a 50 kV y 0,6 mA, y el tiempo de adquisición suele ser de 500 segundos para cada punto de análisis. Los espectros adquiridos se ajustan utilizando el programa WinQxas (IAEA).

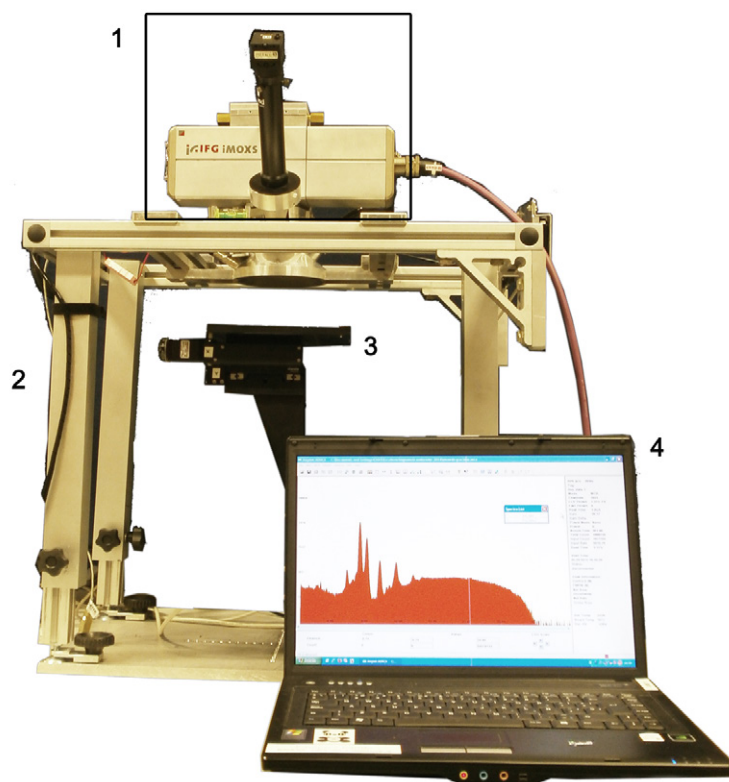


Figura 1. Espectrómetro portátil de micro-XRF del CNA: 1) cabezal de medición; 2) soporte de trípode telescópico; 3) soporte de muestras de tres ejes motorizados 4) ordenador para la adquisición de datos.

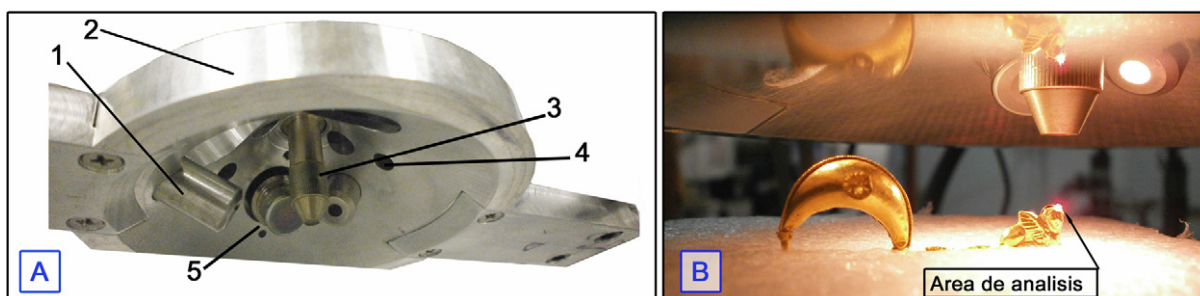


Figura 2. Detalle de la cabeza de medición (A): 1) iluminación; 2) soporte con geometría fija; 3) lente policapilar; 4) diodo láser y 5) detector SDD. La figura (B) muestra el punto de análisis señalado por la intersección de los dos láseres.

Estudio de joyería antigua. Arqueología experimental

La producción de trabajos en oro refleja directamente la evolución de una civilización, ya que está relacionada con la producción de joyas, monedas y objetos decorativos, generalmente diseñados para ocasiones particulares o destinados a usos rituales. La composición metálica de la decoración de joyas puede proporcionar información valiosa sobre el tipo de materia prima, los tratamientos térmicos y los métodos de unión utilizados, por lo que se emplea cada vez más el análisis de metales para estudios arqueológicos e interpretaciones históricas. De hecho, los objetos de oro tienen la ventaja de ser considerados materiales homogéneos gracias a la buena solubilidad de Au, Ag y Cu, componentes principales de las aleaciones antiguas, y la capacidad de permanecer en condiciones relativamente buenas después de años de enterramiento debido a su alta resistencia a las alteraciones químicas. Estas características de las aleaciones de oro permiten estudiar satisfactoriamente la tecnología de los artefactos de oro mediante el mero análisis superficial que proporcionan XRF y gran parte de las técnicas no destructivas.

La mayoría de los objetos complejos de oro antiguos se produjeron uniendo diferentes elementos decorativos entre sí. Las fuentes históricas, como *Naturalis Historia* de Plinio el Viejo, *Leyden Papyrus X* y los ensayos del siglo XVI han proporcionado muchas recetas de los métodos de unión empleados en la antigüedad, pero obviamente carecen de información analítica, lo que puede generar confusión sobre su interpretación. Las principales técnicas utilizadas en la antigüedad fueron tres: unión por difusión en estado sólido con sal de cobre, soldadura por aleación o soldadura fuerte y fusión o soldadura autógena.

Aunque los resultados científicos obtenidos del estudio de una amplia variedad de objetos de oro (Demortier, 1996; Ontalba Salamanca *et al.*, 1998, 2001; Ortega-Feliu *et al.*, 2007; Guerra *et al.*, 2004; Scrivano *et al.*, 2013; 2017) han proporcionado recientemente información importante sobre las técnicas de fabricación, todavía hay muchos aspectos inexplorados sobre los procesos de soldadura. Una contribución complementaria al análisis de estos objetos podría surgir de la arqueología experimental, un método de investigación que se está extendiendo recientemente. Este método intenta reproducir los procesos de fabricación siguiendo las técnicas originales (Thouvenin, 1973) descritas por las fuentes literarias antiguas. En la arqueometría, este enfoque experimental pretende servir como un método para la producción de muestras simuladas, el control de las materias primas y los procedimientos de fabricación que se utilizarán como referencias. Estas muestras pueden ser analizadas utilizando diferentes técnicas, incluyendo las destructivas que generalmente no se permiten en el análisis aplicado a los objetos del Patrimonio Cultural. El análisis científico de estas muestras y la comparación con los resultados de los artefactos arqueológicos pueden resolver, en algunos casos, las hipótesis relativas a los procesos empleados.

Los antiguos orfebres utilizaron una gran variedad de materiales y técnicas de unión para crear joyas con complejos patrones decorativos. En realidad, es común encontrar diferentes técnicas de soldadura empleadas en el mismo artefacto, dependiendo de las distintas funciones y formas de los elementos a unir. Cada método de unión presenta diferentes características, como robustez y aspecto.

Las joyas complejas se producen uniendo las diversas partes en varias etapas del proceso. Cada etapa implica disminuir la temperatura para evitar daños o fusión de las secciones previamente unidas. Por tanto, es interesante relacionar tanto la composición de las aleaciones empleadas como el área de unión con la temperatura de fusión a la que se producen los diversos procesos. Para ello se utiliza la curva *liquidus* del diagrama ternario de la aleación Au-Ag-Cu. Esta curva especifica la temperatura por encima de la cual un material es completamente líquido y por debajo de la cual comienza la cristalización del mismo, con la coexistencia de la fase líquida y cristales, hasta alcanzar la cristalización completa. De este modo, el uso de diferentes temperaturas permite unir varios elementos en distintas etapas del proceso de construcción sin fundir o alterar partes previamente unidas.

Por todo ello, con el objetivo de comprender las técnicas de producción de las joyas de oro antiguas, en particular de las culturas tartésica y etrusca, a partir de la caracterización sistemática de los diferentes métodos de unión de los metales utilizados para producir estos objetos, decidimos reproducir los procedimientos utilizados en la antigüedad mediante arqueología experimental, para lo cual se prepararon, con las recetas clásicas, soldaduras que unían pequeñas láminas fabricadas con distintos tipos de aleaciones de oro (figura 3).

Los distintos tipos de soldadura fueron estudiados por diferentes métodos analíticos para caracterizarlos tanto a nivel de composición como a nivel microestructural (SEM-EDS, metalografía, μ -XRF y μ -PIXE). Los resultados obtenidos (Scrivano *et al.*, 2017) muestran que la unión por difusión en estado sólido con sal de cobre presenta una estructura hexagonal

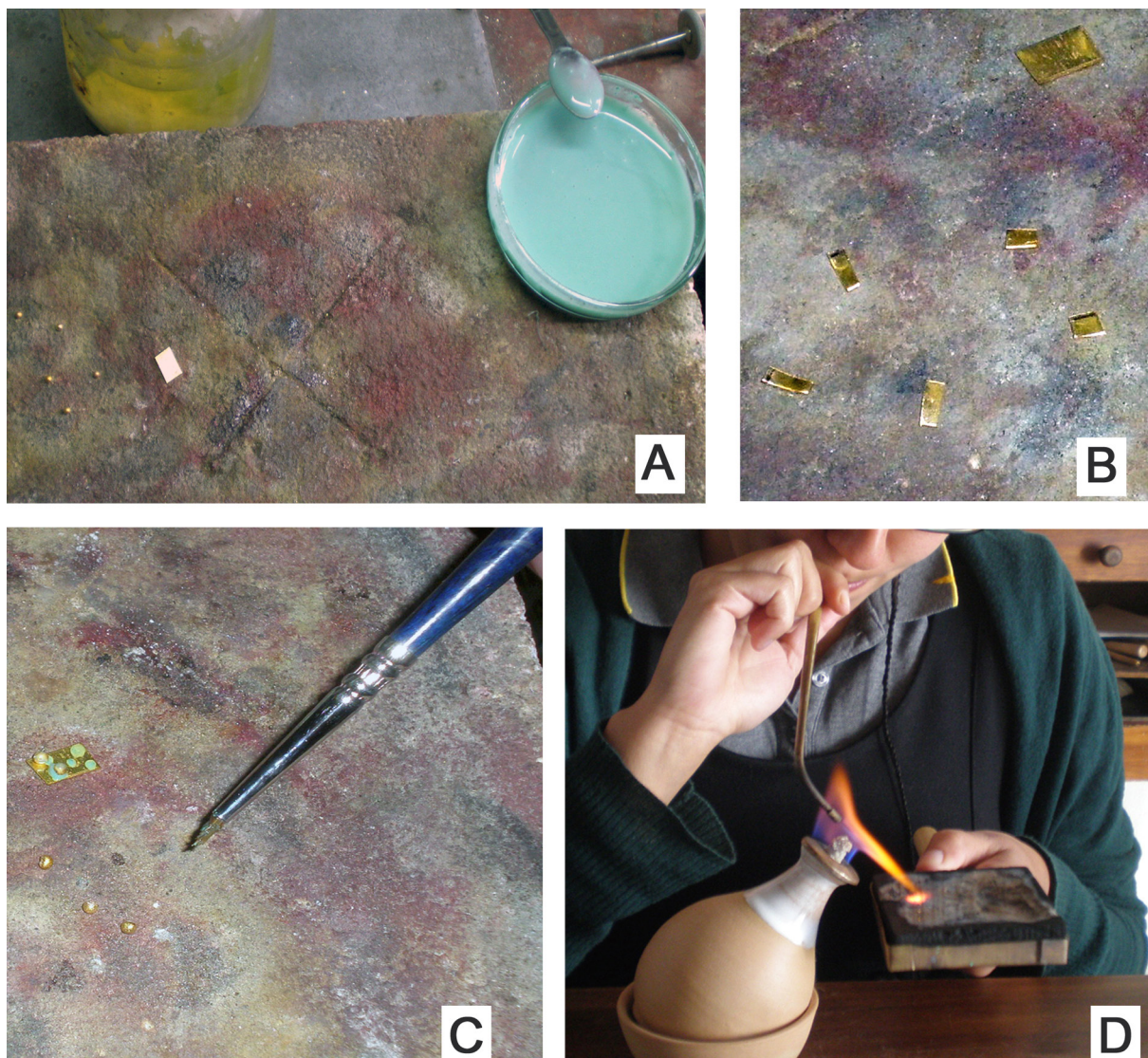


Figura 3. Soldadura por sal de cobre mediante arqueología experimental. A) Producción de la solución de sal de cobre; B) fabricación de los gránulos; C) posicionamiento de los gránulos con la solución de sal de cobre y D) soldadura de los gránulos a la lámina mediante el uso de un soplete.

cristalina sin cambios de fase en el punto de unión, donde solo se observa una variación en el tamaño del grano (figura 4a). En cuanto a la composición, este método de soldadura se caracteriza por un aumento local en la concentración de cobre y una pequeña disminución en el contenido de oro (figura 4b).

Por el contrario, la soldadura por aleación muestra una estructura dendrítica porosa debido a la superposición de la aleación de soldadura y la estructura cristalina de las láminas originales como se aprecia en la figura 5. Además, el análisis de la composición reveló un incremento de las concentraciones de plata y cobre y una reducción simultánea de la concentración de oro, como se observa en la figura 6.

Finalmente, en la soldadura autógena no se observaron cambios a nivel microestructural y de composición. Sin embargo, otro tipo de método de unión, supuestamente también

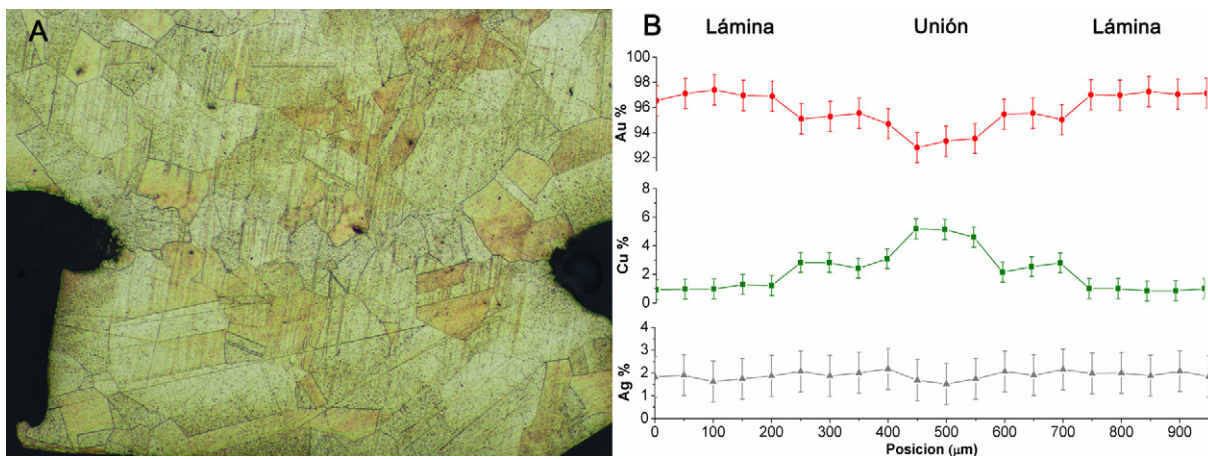


Figura 4. Metalografía de la soldadura por difusión de sal de Cu entre dos láminas. La zona de unión se corresponde con la parte más estrecha entre las dos láminas (A). Análisis de la soldadura por difusión de sal de Cu mediante micro-XRF. El barrido de la zona de soldadura de la aleación H muestra un aumento de Cu (B).

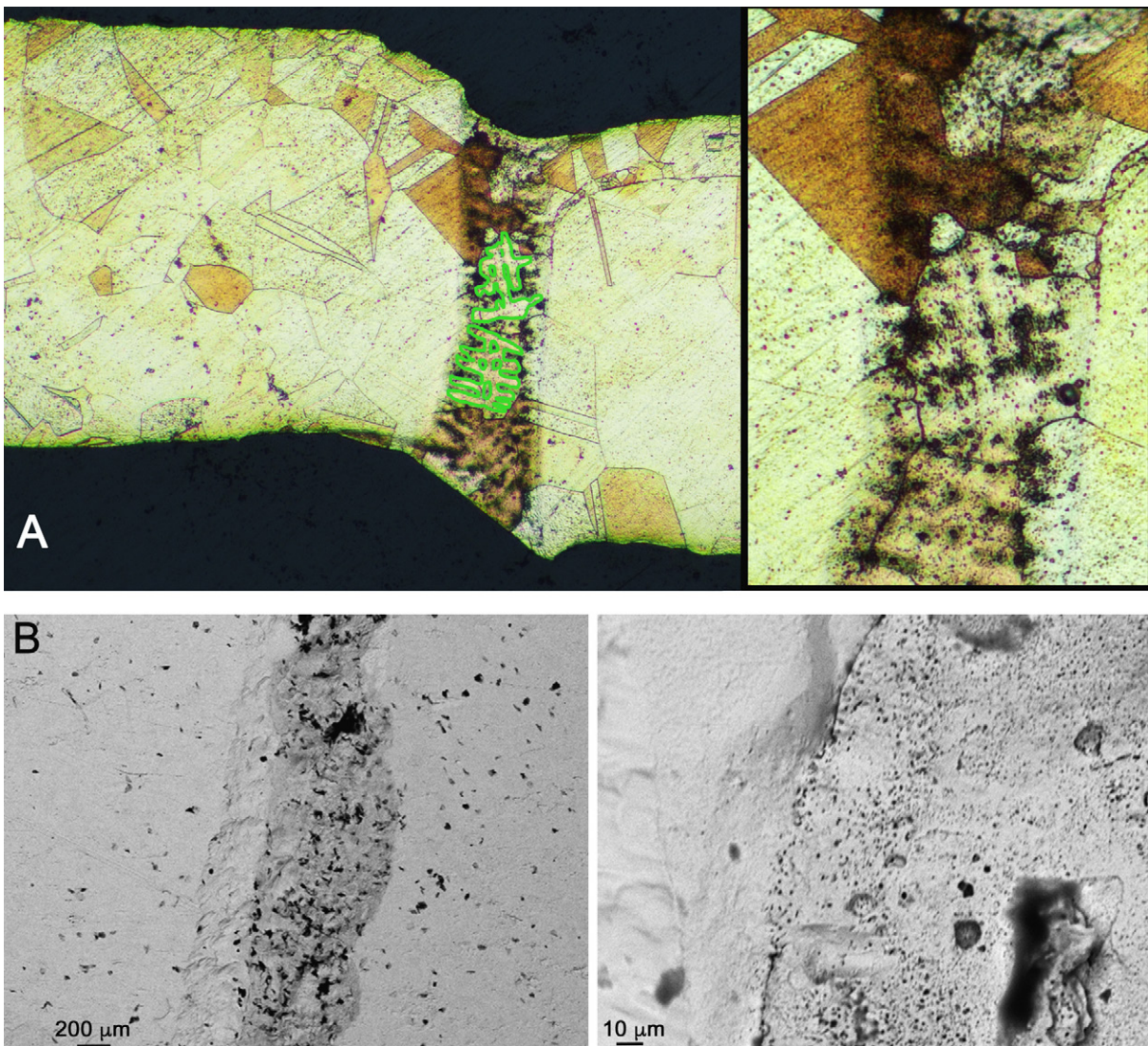


Figura 5. Metalografía de la soldadura por aleación. En la parte central se aprecian las formaciones dendríticas (A). Imagen SEM donde se aprecia la profusa porosidad de la zona de unión (B).

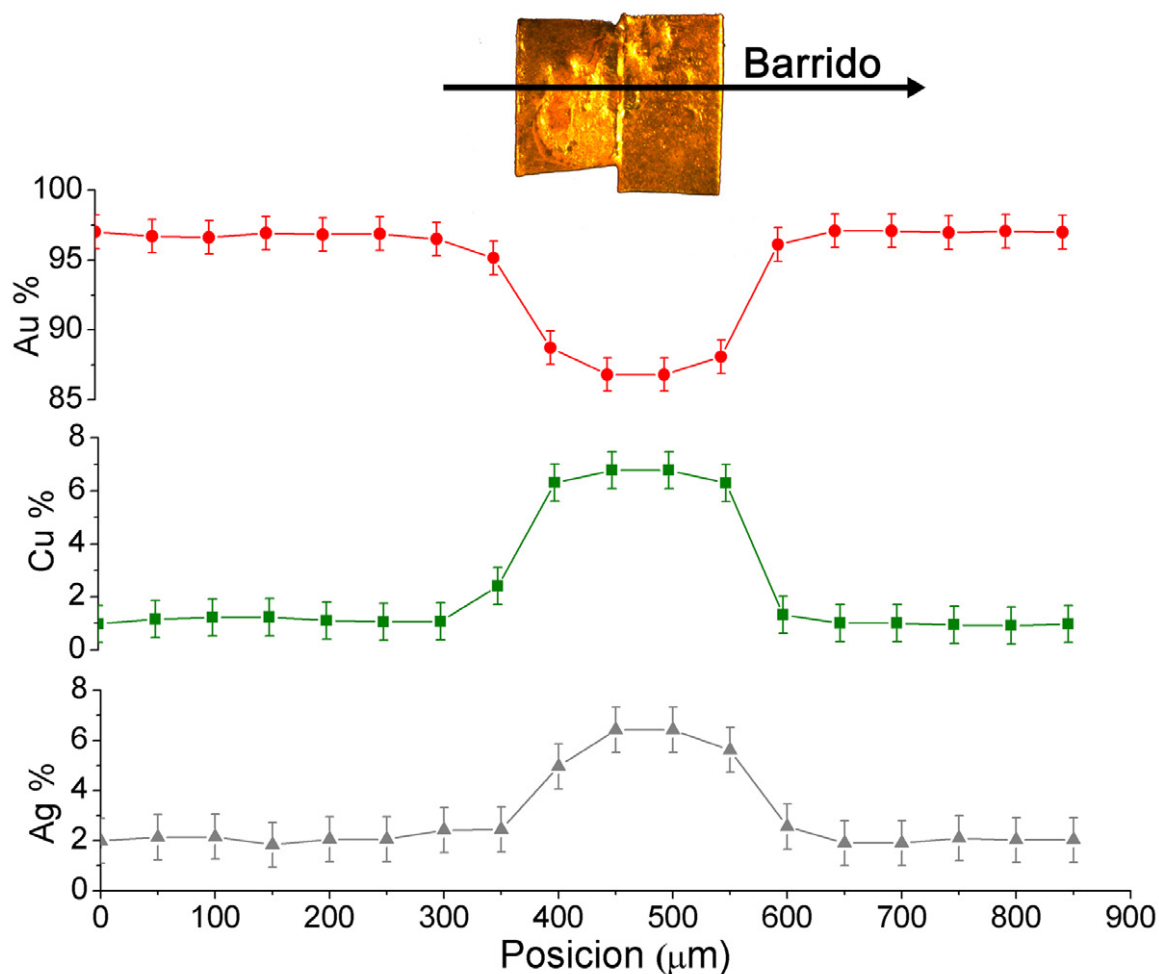


Figura 6. Análisis de la soldadura por aleación mediante micro-XRF. El barrido de la zona de soldadura muestra un aumento de Cu y Ag y una disminución de Au.

basado en la aplicación local de calor sin ningún material soldante, que hemos denominado fusión local, ha sido identificado por otros autores y por nosotros mismos (Demortier, 1996; Ontalba Salamanca *et al.*, 1998, 2001; Scrivano *et al.*, 2017), en algunas joyas arqueológicas que muestran un aumento del contenido de oro y una disminución de plata y cobre en la zona de unión. Hasta ahora no hemos logrado reproducir experimentalmente este último método, si bien comprobamos que todos estos métodos de soldadura son distinguibles entre sí por los cambios de concentraciones de la aleación ternaria Au-Ag-Cu que ocurren en las zonas de soldadura respecto de la composición de los elementos que se están uniendo.

Limitaciones de la fluorescencia de rayos X. Combinación con otras técnicas de análisis no destructivas

La aplicación de técnicas analíticas en objetos de arte y arqueología plantea uno de los principales problemas cuando se trata de objetos de valor incalculable ya que el muestreo, corte, pulido o cualquier tipo de modificación es inaceptable. En consecuencia, un análisis no destructivo es el único enfoque posible. Sin embargo, muchas de las técnicas de análisis no

destructivas tradicionales para este campo se basan en la detección de los rayos X característicos, como es el caso de la fluorescencia de rayos X, lo que hace que se trate de un análisis superficial. Sin embargo, las técnicas de superficie tienen que ser utilizadas con mucha precaución, especialmente en el caso de la determinación de la composición de aleaciones antiguas, porque solo se analiza una capa superficial de profundidad limitada, desde 1-2 micras hasta 20-30 micras. La superficie de las aleaciones antiguas pueden haber sido alterada por diversos factores, entre ellos el propio proceso de fabricación, la corrosión, oxidación y los tratamientos de limpieza, y su composición puede no ser representativa del material en volumen. En la mayoría de los casos, la composición volumétrica no puede medirse directamente. Por ejemplo, las aleaciones plata-cobre antiguas son conocidas por estar afectadas con frecuencia por un enriquecimiento en superficie del contenido en plata (Cope, 1972; La Niece, 1993), y la extensión en profundidad de este enriquecimiento puede alcanzar varios cientos de micras, mucho más allá de la profundidad de penetración de las técnicas de superficie. El conocimiento preciso de la composición de monedas antiguas de plata-cobre es necesario con el fin de evaluar la auténtica ley de la aleación, ya que la concentración relativa de los elementos principales proporciona información valiosa sobre los cambios en la política monetaria, posibles cambios económicos y de la tecnología de los materiales empleados. En las monedas antiguas de Ag-Cu, la corrosión afecta principalmente a la fase rica en cobre. El principal producto de corrosión formado es óxido de cobre. Durante este proceso de corrosión, el cobre podría ser lixiviado (Klockenkämper, Hubert y Hasler, 1999; Beck *et al.*, 2004), lo que resulta en la disminución preferencial del Cu y el enriquecimiento aparente de la Ag en la superficie; por lo tanto, el enriquecimiento de la plata en la superficie es, por lo general, consecuencia de la corrosión preferencial de cobre debido a su electronegatividad más alta en relación a la plata. Diferentes estudios de la corrosión realizados en secciones transversales de monedas antiguas mediante técnicas superficiales han revelado diferencias de hasta un 50 % entre la composición del núcleo y de la superficie. En concreto, para monedas antiguas corroídas con concentraciones de Ag en volumen entre 20 % y 71 %, se encontraron concentraciones superficiales de 80 % a 95 % (Klockenkämper, Hubert y Hasler, 1999; Beck *et al.*, 2004; Linke *et al.*, 2003). Para concentraciones en volumen superiores (72 %-92 % de Ag), se han encontrado concentraciones superficiales incluso mayores (hasta el 99 % de Ag). Algunos autores han indicado también que el enriquecimiento de Ag podría haber sido deliberadamente llevado a cabo durante el proceso de manufactura (Rodrigues *et al.*, 2011), y que los tratamientos químicos usuales de limpieza podrían contribuir de igual manera a este enriquecimiento superficial (Beck *et al.*, 2008), aunque es difícil determinar el peso de cada contribución junto con la corrosión en las monedas antiguas. Por tanto, los métodos de análisis superficiales no destructivos no deberían ser directamente usados para determinar la ley de monedas antiguas de Ag-Cu, a menos que la fiabilidad de los resultados pueda asegurarse usando alguna metodología complementaria.

Aunque se han propuesto distintas aproximaciones no destructivas para obtener datos de composición en volumen, la mayoría de ellos están dirigidos solamente a estimar el error cometido o detectar posibles enriquecimientos superficiales de la plata y entonces seleccionar las medidas no afectadas. Nosotros hemos propuesto la determinación de la composición en volumen *corrigiendo* las concentraciones de superficie combinando esos resultados con técnicas no destructivas de volumen. Inicialmente realizamos la combinación de resultados de XRF con transmisión gamma (GRT) para el análisis de bronce arqueológicos. Para ello analizamos por XRF monedas y objetos de bronce antiguos, cuyas superficies suelen estar fuertemente alteradas por la corrosión, y mediante transmisión gamma obtuvimos el coeficiente de atenuación gamma de las mismas, lo que nos permite obtener la composición en volumen del material al combinar ambos resultados. Posteriormente, hemos utilizado el mismo método para el caso de aleaciones de plata.

Hasta ahora el montaje experimental que hemos empleado para GRT consiste en una fuente puntual de ^{241}Am (60 keV, 3,7 GBq) de 6 mm de diámetro, blindada con plomo y colimada a un haz de 4 mm de diámetro. Los rayos gamma transmitidos desde la fuente se detectan con un detector de NaI(Tl) rodeado de placas de cobre para absorber los rayos X de Pb del blindaje que rodea al detector.

El método de corrección GRT (Respaldiza *et al.*, 1990, 1994) se basa en la hipótesis de que uno de los elementos (llamado «elemento principal») se ve afectado por la corrosión de la superficie de una manera diferente que el resto, por lo que la muestra puede ser tratada como un compuesto binario de ese elemento particular y de un «elemento artificial» compuesto por la mezcla del resto de elementos manteniendo la misma composición relativa entre ellos que la que tienen en superficie, y que denominamos «elemento mezcla». Con esta hipótesis, el coeficiente de atenuación másico de la mezcla μ_{mezcla} se calcula teóricamente mediante el uso de la regla de aditividad de Bragg aplicando las concentraciones superficiales obtenidas por XRF. Este coeficiente, junto con el de atenuación másico μ medido directamente por GRT, permite corregir las concentraciones de XRF de los elementos en volumen.

La elección correcta del elemento principal es esencial para este cálculo, pero eso depende de los mecanismos de corrosión de la aleación. Por ejemplo, en las aleaciones de platino-cobre, el cobre debe ser considerado como el elemento principal debido a su corrosión preferencial y la pérdida subsiguiente al medio ambiente mediante mecanismos de lixiviación, a pesar de que la plata es a menudo el principal constituyente de la aleación. Así, el «elemento mezcla» se compone de elementos de superficie no afectados por la corrosión y sus proporciones relativas se puede suponer que sea aproximadamente las mismas que en el material en volumen. En el caso de las monedas antiguas de plata, los análisis metalográficos y microestructurales nos han proporcionado importante información sobre el proceso de corrosión que confirma esta elección (Ager *et al.*, 2016).

Otra limitación de la técnica de XRF es su resolución en profundidad. En efecto, la señal que se tiene en los espectros de XRF, en forma de fotopicos de los distintos elementos, es obtenida de forma acumulativa desde todas las profundidades desde las que son ionizados, de forma efectiva, los átomos de los distintos elementos que componen la muestra por la radiación primaria, y desde la que los rayos X característicos de dicho elemento no sean absorbidos en la misma muestra en su camino de salida hacia el detector, por lo que en realidad la profundidad «efectiva» de análisis es distinta para cada elemento en función de la energía de sus rayos X característicos. Por tanto, la información de la composición en función de la profundidad o «perfil de concentraciones» que podemos obtener con XRF convencional es prácticamente nula. En aquellos problemas en los que dicha información sea relevante, nos veremos obligados a recurrir a otras técnicas de análisis no destructivas como, por ejemplo, la retrodispersión Rutherford (RBS), en la que el uso de haces de iones de alta energía permite la obtención de perfiles de concentración de forma no destructiva con una resolución en profundidad de decenas o centenas de nanómetros hasta profundidades de algunas decenas de micrómetros.

Una posibilidad para obtener información en profundidad con XRF sería utilizar la técnica denominada microfluorescencia de rayos X confocal (CXRF) (Laclavetine *et al.*, 2016), en la que un uso combinado de lentes policapilares a la salida del tubo de rayos X y delante del detector de rayos X permite obtener información analítica en el interior de la muestra (figura 7). Con un volumen analítico de varias decenas de micras, su resolución en profundidad es del orden de algunas micras y se logra obtener información hasta varios milímetros de profundidad dentro de matrices ligeras. Tiene la gran ventaja de poder ser implementada en equipos portátiles que facilitan el análisis *in situ* de objetos de interés histórico.

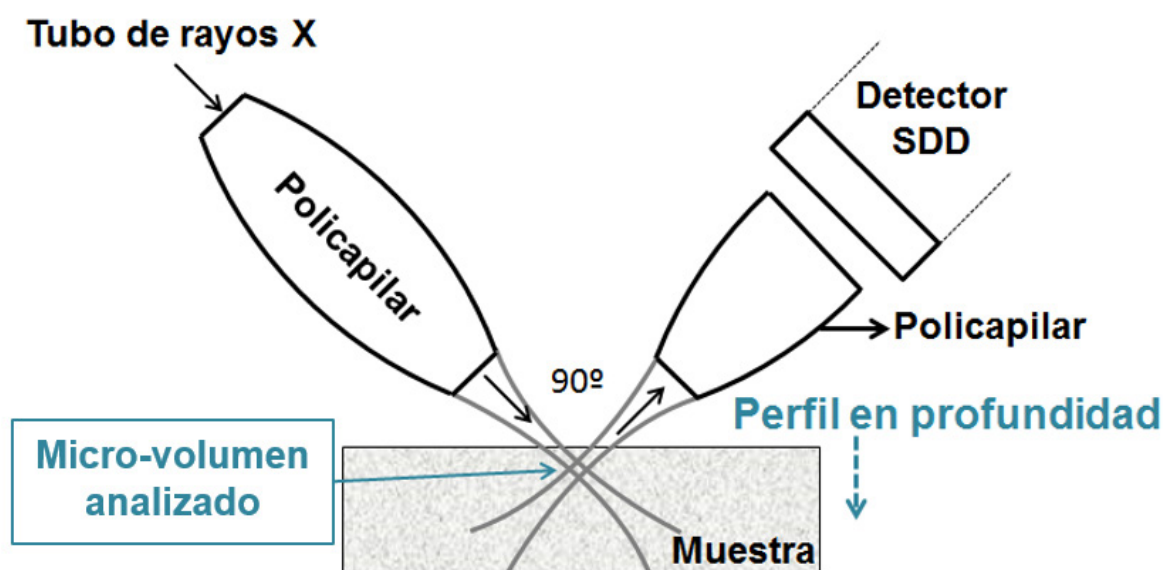


Figura 7. Esquema del equipo de microfluorescencia confocal y detalle del microvolumen que permite analizar la muestra.

El solape de los focos de ambos policapilares forma un microvolumen con el cual, variando la posición entre el dispositivo CXRF y la muestra, permite sondear el interior del objeto obteniendo un perfil en profundidad, representado por la evolución del área de un pico característico de un elemento en función de la posición del dispositivo a la muestra (figura 7).

En el CNA hemos desarrollado un sistema portátil de CXRF pensado expresamente para su uso en el estudio de obras de interés en Patrimonio Cultural y más específicamente en el análisis *in situ* de capas pictóricas de forma no destructiva. El equipo, al que hemos llamado «Micro X-Ray Fluorescence Confocal for Cultural Heritage Analysis» (μXRF-CONCHA), consiste en:

- Un tubo microfoco de rayos X (30W, ánodo de W, 50 kV, 800 μ A, tamaño de haz de 50 μ m) (IMOXS, IFG) (Bjeoumikhov *et al.*, 2004) con un policapilar a su salida para enfocar el haz de radiación primaria con que excitamos la muestra a analizar (figura 8).
- Un detector de rayos X Super SDD (área de 25 mm², espesor del cristal de Si de 500 μ m, resolución de 127 eV a 5,9 keV) (X123SDD, Amptek) con otro policapilar a su entrada, restringiendo la zona de análisis, produciendo el volumen confocal.
- Motor de movimiento Z controlado por ordenador (incertidumbre en el posicionamiento inferior a 1 μ m), lo cual permite el barrido de una muestra de forma automática (LIMES 80-200-HSM, OWIS).
- Dos láseres permiten posicionar la muestra al inicio de la medida mediante el uso de una *webcam* y dos fibras ópticas iluminan la muestra (figura 8).

Su utilización en un brazo robótico de movimiento X-Y controlado por ordenador permite el estudio directo de las capas pictóricas en el propio lugar de exhibición o almacenaje de las obras pictóricas, sin necesidad de toma de muestras.

También hemos iniciado su uso en el estudio de metales sobredorados y capas metálicas de corrosión, aunque es muy probable que la fuerte autoabsorción de la mayoría de los metales limite la utilidad de los resultados obtenidos.

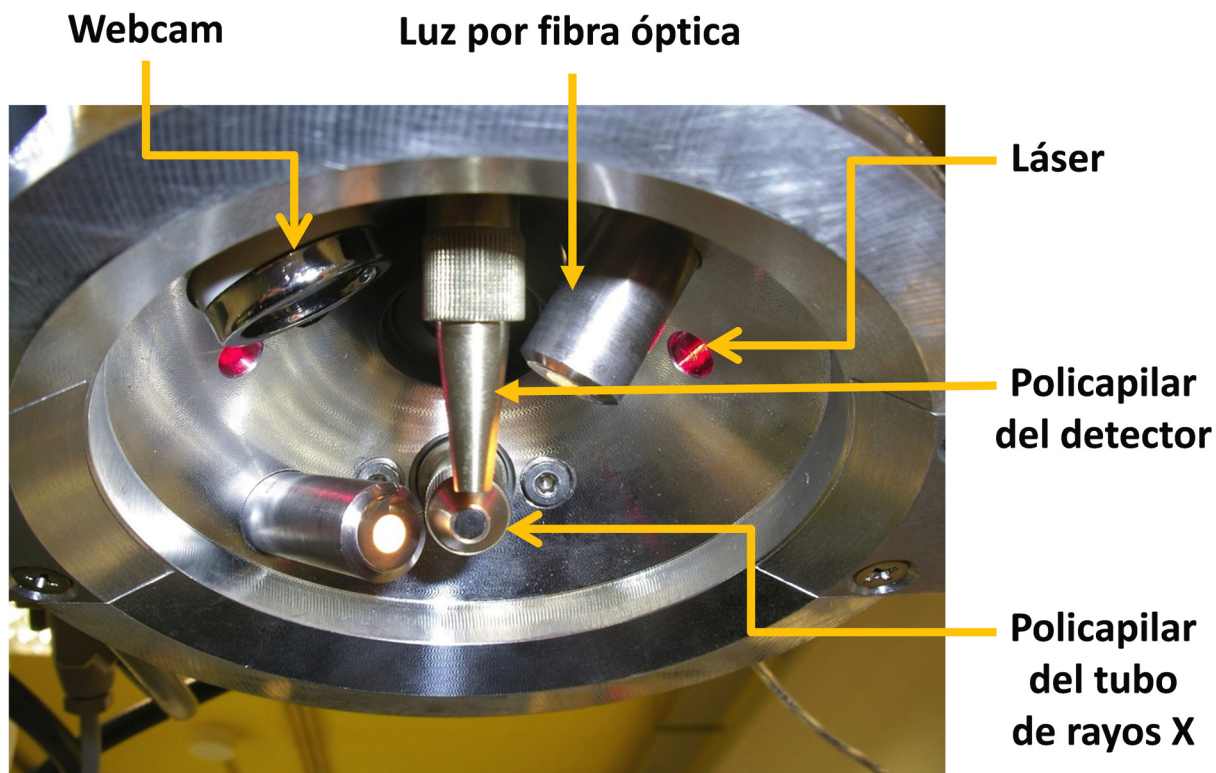


Figura 8. Cabeza del sistema μ XRF-CONCHA.

Conclusiones

Los resultados obtenidos con el uso del nuevo equipo de microfluorescencia de rayos X en el estudio de joyas de oro de valor arqueológico han demostrado que es una herramienta muy adecuada y útil para el análisis químico elemental no destructivo y que puede sustituir con éxito a otras técnicas analíticas similares como el PIXE (*Particle Induced X-Ray Emission*) cuando los objetos no pueden ser trasladados a un acelerador de partículas.

El uso de la arqueología experimental, con la que se pretende reproducir métodos de producción antiguos, ha permitido determinar con mayor claridad las características físico-químicas de tres tipos de soldaduras empleadas en joyería de oro de valor patrimonial. Esta información, junto con el uso del sistema de microfluorescencia, ha sido utilizada para el estudio de tesoros de gran valor cultural y artístico sin necesidad de su traslado ni de toma de muestras.

La técnica GRT (*Gamma Ray Transmission*), también de carácter nuclear, ha demostrado complementar con éxito el estudio de monedas de plata-cobre de valor histórico que presentaban enriquecimientos superficiales de la plata. Así, los resultados obtenidos con XRF, de carácter superficial, son corregidos con el coeficiente de atenuación que proporciona GRT, de manera que se pueden realizar estimaciones de la composición química del interior de los objetos que presentan pátinas de corrosión o de enriquecimiento.

Nuevos métodos experimentales se están poniendo a punto en la actualidad para resolver las limitaciones técnicas de la fluorescencia de rayos X. Por ejemplo, nuestro grupo de

investigación ha desarrollado un equipo de microfluorescencia de rayos X confocal portátil, que ha sido ya utilizado con éxito en el estudio de capas pictóricas y con el que se está evaluando la viabilidad del estudio de capas en objetos metálicos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos del Ministerio de Economía y Competitividad HAR2012-33002 y HAR2015-67113-P y el proyecto de la Junta de Andalucía P09-HUM4544. Los autores agradecen al profesor Emilio Gómez la ayuda prestada en el desarrollo del sistema de iluminación del equipo de micro-XRF portátil.

Bibliografía

- AGER, F. J.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; PAUL, A.; GÓMEZ-MORÓN, A.; SCRIVANO, S.; ORTEGA-FELIU, I., y RESPALDIZA, M. A. (2016): «Combining XRF and GRT for the analysis of ancient silver coins». *Microchemical Journal*, 126: 149-154.
- BECK, L.; BOSONNET, S.; REVEILLON, S.; ELIOT, D., y PILON, F. (2004): «Silver surface enrichment of silver-copper alloys: a limitation for the analysis of ancient silver coins by surface techniques». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 226: 153-162.
- BECK, L.; ALLOIN, E.; BERTHIER, C.; REVEILLON, S., y COSTA, V. (2008): «Silver surface enrichment controlled by simultaneous RBS for reliable PIXE analysis of ancient coins». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 266: 2320-2324.
- BJEOUNIKHOV, A.; LANGHOFF, N.; RABE, J., y WEDELL, R. (2004): «A modular system for XRF and XRD applications consisting of a microfocus X-ray source and different capillary optics». *X-Ray Spectrometry*, 22: 312-316.
- COPE, L. H. (1972): «Surface-silvered ancient coins». En *Methods of chemical and metallurgical investigations of ancient coinage*. Londres, pp. 261-278.
- DEMORTIER, G. (1996): «Ion beam studies of archaeological gold jewellery items». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 113: 347-353.
- GUERRA, M. F.; CALLIGARO, T.; RADTKE, M.; REICHE, I., y RIESEMEIER, H. (2005): «Fingerprinting ancient gold by measuring Pt with spatially resolved high energy SyXRF». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 240: 505-511.
- IAEA, International Atomic Energy Agency, WinQXAS - Quantitative X-ray Analysis System for MS Windows operating system, version 1.40, copyright © 2002.
- KLOCKENKÄMPER, R.; HUBERT, H., y HASLER, K. (1999): «Detection of near-surface silver enrichment on Roman imperial silver coins by X-ray spectral analysis». *Archaeometry*, 41: 311-320.
- LA NIECE, S. (1993): «Silvering». En S. LA NIECE, y P. T. CRADDOCK (eds.). Butterworth-Heinemann Publishers, pp. 201-210.
- LACLAVETINE, K.; AGER, F. J.; ARQUILLO, J.; RESPALDIZA, M. A., y SCRIVANO, S. (2016): «Characterization of the new mobile confocal micro X-ray fluorescence (CXRF) system for in situ non-destructive cultural heritage analysis at the CNA: μ XRF-CONCHA». *Microchemical Journal*, 125: 62-68.
- LINKE, R.; SCHREINER, M.; DEMORTIER, G., y ALRAM, M. (2003): «Determination of the provenance of medieval silver coins: potential and limitations of x-ray analysis using photons, electrons or protons». *X-Ray Spectrometry*, 32: 373-380.

- ONTALBA SALAMANCA, M. A.; DEMORTIER, G.; FERNÁNDEZ GÓMEZ, F.; COQUAY, P.; RUVALCABA-SIL, J. L., y RESPALDIZA, M. A. (1998): «PIXE and SEM studies of Tartesic gold artefacts». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 136-138: 851-857.
- ONTALBA SALAMANCA, M. A.; AGER, F. J.; YNSA, M. D.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; RESPALDIZA, M. A.; GARCÍA-LÓPEZ, J.; FERNÁNDEZ-GÓMEZ, F.; DE LA BANDERA, M. L., y GRIME, G. W (2001): «External microbeam set-up at the CAN (Sevilla) and its application to the study of Tartesic jewellery». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 181: 664-669.
- ORTEGA-FELIU, I.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; ONTALBA SALAMANCA, M. A.; RESPALDIZA, M. A.; DE LA BANDERA, M. L., y OVEJERO-ZAPPINO, G. (2007): «Gold and electrum jewellery in the strategic area of Guadalquivir in Phoenician period». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 260: 329-335.
- RESPALDIZA, M. A.; BARRANCO, F.; GÓMEZ-CAMACHO, J.; GÓMEZ-TUBÍO, B. M., y RUIZ-DELGADO, M. M. (1990): «Combining PIXE and XRF with gamma-ray transmission to get accurate analysis of archaeological bronzes». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 50: 226-230.
- RESPALDIZA, M. A.; GÓMEZ-TUBÍO, B. M.; DEL JUNCO, A. S.; BARRANCO, F., y SAIZ-JIMÉNEZ, C. (1994): «Non-destructive analysis of archaeological bronzes by nuclear techniques». *Nuclear Instrument and Methods Physics Research B*, 89: 109-113.
- RODRIGUES, M.; CAPPA, F.; SCHREINER, M.; FERLONI, P.; RADTKE, M.; REINHOLZ, U.; WOYTEK, B., y ALRAM, M. (2011): «Further metallurgical analyses on silver coins of Trajan (AD 98-117)». *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 26: 984-991.
- SCRIVANO, S.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; ORTEGA-FELIU, I.; AGER, F. J.; MORENO-SUÁREZ, A. I.; RESPALDIZA, M. A.; DE LA BANDERA, M. L., y MARMOLEJO, M. (2013): «Identification of soldering and welding processes in ancient gold jewelry». *X-Ray Spectrometry*, 42: 251-255.
- SCRIVANO, S.; ORTEGA-FELIU, I.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; AGER, F. J.; DE LA BANDERA, M. L.; RESPALDIZA, M. A., y ONTALBA SALAMANCA, M. A. (2017): «Non-destructive micro-analytical system for the study of the manufacturing processes of a group of gold jewels from “El Carambolo” treasure». *Radiation Physics and Chemistry*, 130: 133-141.
- SCRIVANO, S.; GÓMEZ-TUBÍO, B.; ORTEGA-FELIU, I.; AGER, F. J.; PAUL, A., y RESPALDIZA, M. A. (2017): «Compositional and microstructural study of joining methods in archaeological gold objects». *X-Ray Spectrometry*. DOI 10.1002/xrs.2738.
- THOUVENIN, A. (1973): «Le soudure dans la construction des oeuvres d'orfèvrerie antique et ancienne». *Revue Archeologique de l'Est et du Centre-Est*, 24: 11-68.

Sant Climent de Taüll.

Análisis del proceso creativo

Núria Oriols, Paz Marquès y Mireia Mestre

Área de Restauración y Conservación Preventiva

Museu Nacional d'Art de Catalunya, Barcelona

nuria.oriols@museunacional.cat

paz.marques@museunacional.cat

mireia.mestre@museunacional.cat

Resumen: El análisis interdisciplinar de las pinturas murales de Sant Climent de Taüll ha aportado información sobre las distintas etapas del proceso creativo. La composición pictórica se distribuye sobre una base geométrica pentagonal. El dibujo, a pincel sobre un enlucido fresco, se realizó con una mezcla de negro y ocre amarillo, y además se usó la cuerda, el compás y la incisión. Se han utilizado modelos y patrones para la realización de los rostros. Los pigmentos se han aplicado en una superposición de dos o tres capas: las primeras sobre el mortero fresco y las últimas al seco, coincidiendo con los detalles más minuciosos. El maestro de Taüll aplicó el color y realizó mezclas, para carnaciones o marrones, según las descripciones que se recogen en tratados medievales como el de Teófilo, siguiendo la técnica de los tres tonos. La cruz del nimbo contiene restos de estaño alterado, indicando un posible dorado.

Palabras clave: Sant Climent de Taüll, pintura mural, geometría, medieval, dorado.

Abstract: The interdisciplinary analysis of the wall paintings of Sant Climent de Taüll has provided information on the different stages of the creative process. The pictorial composition is distributed on a geometric pentagonal scheme. The drawing, made with brush on fresh lime mortar was done using a mixture of yellow ocher and black, with the help of the rope, the compass and with incision tools. Models and patterns were used to draw the faces. Pigments were applied in superposition of two or three layers: the first ones on the fresh mortar and the last ones over the dry one, matching with the most meticulous details. The master of Taüll applied colors and made mixtures, for flesh or browns, according the descriptions given in medieval treatises as Theophilus, following the technique of the three tones. The cross of the nimbus contains traces of altered tin, which indicates a possible gilded zone.

Keywords: Sant Climent de Taüll, wall painting, geometry, medieval gilding.

1. Introducción

Las pinturas murales de Sant Climent de Taüll, creadas en el siglo XII, son una de las obras más emblemáticas del románico a nivel internacional (figura 1). Algunas claves para comprender la excepcionalidad de esta obra surgen del análisis de su proceso creativo.



Figura 1. Ábside de Sant Climent de Taüll, S. XII. Museu Nacional d'Art de Catalunya. Fotografia: Calveras, Mérida, Sagristà.

El proyecto decorativo programado para estas pinturas se hizo, muy probablemente, con una planificación previa calculada hasta la última pincelada. El maestro de Taüll debía considerar la superficie a policromar, el tema encargado por el comitente y los espacios arquitectónicos de los que disponía. Su taller tenía que contar con artesanos especialistas en el trabajo de la cal, entendidos en la preparación de los muros y conocedores de la elaboración de los colores. El maestro debía pensar en todas las fases del trabajo para realizar la policromía de la superficie. Para ello, debía organizar el espacio mural en su globalidad, marcar las guías separadoras de los espacios, encajar todo el dibujo mediante líneas y formas redondas y por último trasladar los dibujos a la pared, tarea que se realizaba según el orden estipulado de la preparación fresca para pintar.

2. Metodología de análisis

En 2013 tuvo lugar un trabajo conjunto entre diversas instituciones. En el Museu Nacional d'Art de Catalunya se levantó un andamio ante las pinturas originales arrancadas y traspasadas. Mientras tanto, un equipo del Centre de Restauració de Béns Mobles de la Generalitat de Catalunya, bajo la dirección de Pere Rovira y ejecución de Mercè Marquès (Marquès, 2016), localizaba *in situ* los vestigios originales de las pinturas tras varios años de trabajo realizados interrumpida-

mente en 2000, 2001 y 2013. Esta labor paralela de las dos instituciones se ha realizado de forma interdisciplinar, incluyendo restauradores, historiadores, arquitectos y químicos.

Ha sido necesario aplicar un grupo de técnicas analíticas complementarias. Por un lado, se han aplicado técnicas de examen no invasivas, como la reflectografía IR (RIR), el RTI (Reflectance Transformation Imaging) o el estudio dimensional mediante calco. Por otro lado, se han extraído micromuestras representativas para obtener secciones transversales que han sido analizadas mediante microscopía óptica, microscopía electrónica SEM-EDX (en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona, CCiT-UB) y mediante microespectroscopía de infrarrojo FTIR, lo cual ha permitido la caracterización química de los materiales.

Reflectance Transformation Imaging. La aplicación de esta nueva técnica ha proporcionado información valiosa sobre incisiones y superposición de pinceladas. El RTI tiene como base la fotografía que, tratada con un programa informático, permite crear una réplica digital de la obra, similar a una imagen superficial 3D, proporcionando una nueva visión de su relieve. El objeto que se estudia es iluminado y fotografiado desde diferentes ángulos. Las imágenes obtenidas se someten a distintos filtros informáticos que resaltan los contrastes de textura, morfología y relieve del objeto¹.

Estudio dimensional mediante calco. Los calcos a tamaño natural nos han ayudado a corroborar medidas y colores, así como a estudiar el trabajo del artista. La superposición de los calcos realizados en el museo y los realizados *in situ* nos han proporcionado información complementaria y han contribuido a confirmar la metodología de construcción de la obra. A través de los calcos, hemos podido observar y documentar los pequeños motivos decorativos, observar el grueso de las pinceladas y ver indicios del dibujo preliminar. Hemos podido constatar el estado de conservación de la pintura original y de los añadidos², el estado de las telas de traspaso, los clavos utilizados para sujetar los diferentes fragmentos a las estructuras de madera y la alteración de las reintegraciones cromáticas realizadas en el momento que se montaron.

3. Resultados y discusión: el proceso creativo de la obra

3.1. Composición geométrica

Durante la Edad Media se recomendaba a los pintores trabajar según las *proporciones artísticas y sabias*. En los manuscritos, los conocimientos de geometría eran considerados necesarios porque los maestros pintores debían ser capaces de hacer representaciones geométricas y operaciones de medida. No obstante, el uso práctico que se hacía de la geometría distaba mucho de la concepción teórica de la Grecia clásica, donde el ideal de belleza se interpretaba a partir de la doctrina pitagórica: *los números son la base del universo*, y por tanto, la belleza se consideraba sometida a una estructura numérica. Para el cristianismo, sin embargo, la estética no era un centro de interés. En el arte bizantino, el *módulo* de construcción ampliamente utilizado respondía a la búsqueda de la armonía, a través de la aplicación de una unidad básica. En occidente, la composición de figuras a partir de las proporciones se había convertido en

¹ Introdujo esta técnica y colaboró en su aplicación sobre las pinturas murales de Sant Climent de Taüll, Emma Sarró, durante la realización de las prácticas del Máster de Dirección de Proyectos de Conservación-Restauración de la UB. Se explica el funcionamiento del RTI en la página web <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/RTI/> [consulta: 19 de octubre de 2016].

² En el momento de adherir los fragmentos de pintura mural, arrancados y traspasados, a la nueva estructura del Museo, se realizaron cortes para acoplar estas pinturas y se realizaron algunos añadidos para completar el dibujo.

una simple técnica de taller (Sendler, 1981). El manuscrito de Villard de Honnecourt, de la Bibliothèque Nationale de France, ilustra bien este aspecto práctico. Según el historiador Wittkove, uno de los muchos cambios producidos durante el Renacimiento fue el hecho de que los artistas empezaron a dar más importancia a los sistemas de proporción numéricos, racionales, frente a los sistemas geométricos, irracionales (Cabezas, 2002).

La construcción de la figura de la *Maiestas Domini* de Sant Climent de Taüll está regida por la geometría y la proporción, y lo hace de tal forma que se interrelaciona la pintura con la arquitectura. La altura de la semicúpula coincide con $2h$, por tanto, condiciona el diámetro de las dos circunferencias iniciales entrelazadas, a modo de *vesica piscis* (figura 2), a partir de las cuales se extiende toda la composición pictórica. Una cuarta parte de esta medida es el diámetro del nimbo crucífero, elemento central de las imágenes medievales. La utilización de la geometría ha sido determinada en otras pinturas murales románicas de Europa, como en la Chapelle des Moines Berzé-la-Ville, donde la decoración pictórica también está estrechamente relacionada con la arquitectura, en tanto que el módulo de construcción se basa en una determinada altura del edificio (Rollier-Hanselmann, 2014: 64-66).

La ubicación de los distintos elementos plásticos en una gran superficie curva, como es el caso del cuarto de esfera de un ábside, de forma que no presenten deformaciones y la lec-

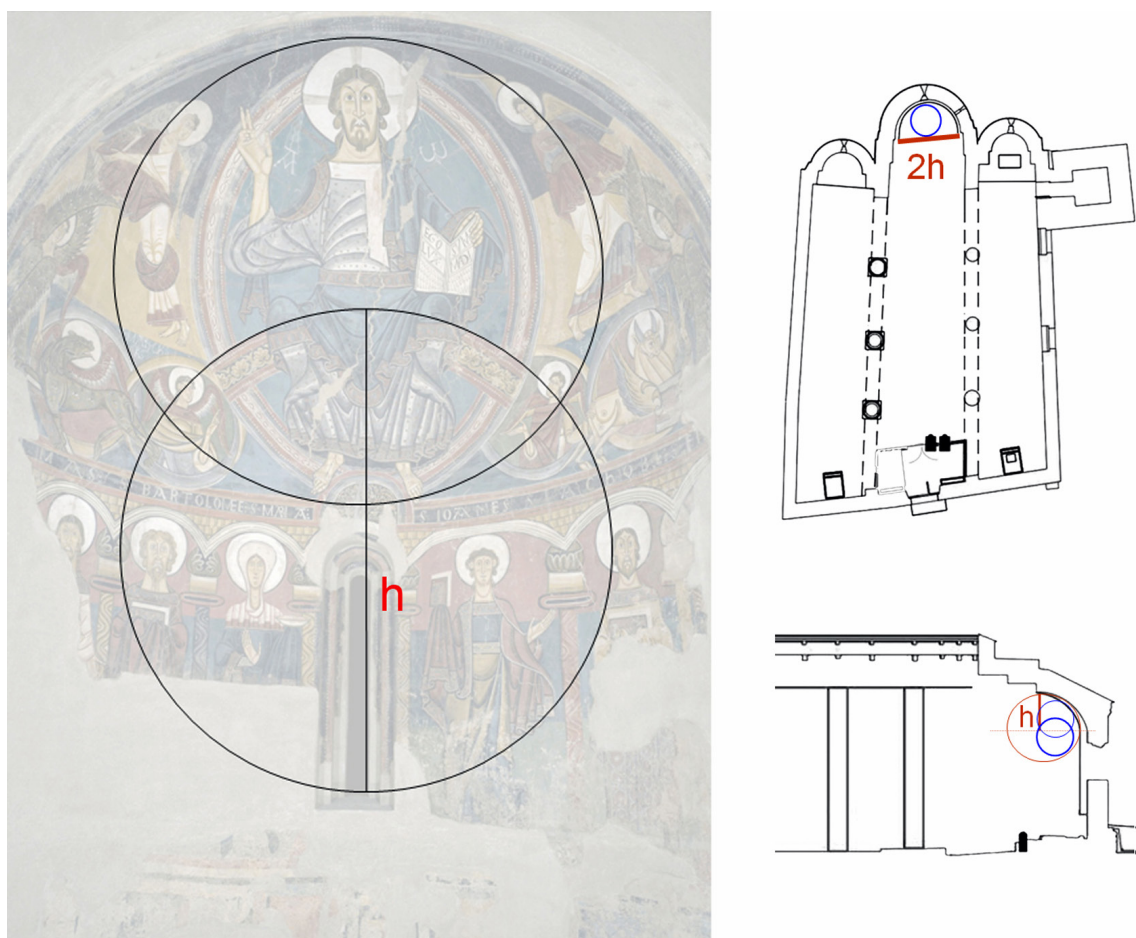


Figura 2. Ubicación de las dos circunferencias iniciales a partir de las cuales se extiende la base geométrica de la composición pictórica. El diámetro coincide con la altura de la semicúpula. La circunferencia inferior marca la forma y posición del trono de la *Maiestas Domini*.

tura iconográfica final sea correcta, no es una tarea trivial. Para ello, las pautas de las líneas constructivas de figuras geométricas resultan especialmente útiles. Un compás, o una cuerda con la que determinar las distintas proporciones ($1/2$, $1/4$, $1/8$) y representarlas en forma de círculos, completos o no, puede ser una herramienta apta y suficiente para ir marcando todas las líneas que ayuden a delimitar la composición final (figura 3).

En la obra que nos ocupa la base geométrica que rige la composición es el pentágono. Esta figura fue ya emblemática para los pitagóricos, puesto que la diagonal y el lado del pentágono son segmentos que no pueden ser medidos por una unidad común, son inconmensurables. Al pentagrama místico pitagórico se le ha atribuido una belleza mágica, ya que es generador de la proporción áurea a partir de la razón entre la diagonal y el lado del pentágono regular. Esta proporción está definida en *Los Elementos de Euclides*³, del año 300 a.C., en el libro VI, definición 3: «Se dice que un segmento está dividido en media y extrema razón cuando un segmento total es a la parte mayor como la parte mayor es a la menor». El mismo Euclides, en otra parte de su obra, utiliza esta relación proporcional para la representación del pentágono regular, facilitando un patrón constructivo a base de una secuencia de líneas, de forma similar a como había hecho ya Hippocrates (Bouleau, 2014: 64). En la figura de la *Maies-tas Domini* se observan múltiples coincidencias con las líneas constructivas del diagrama de Hipócrates (figura 4) y, en consecuencia, se observa la presencia de la razón áurea (figura 5). Muy probablemente, esta proporción no fue aplicada a propósito por el maestro de Taüll, sino que es fruto de seguir unos modelos geométricos. Después de Euclides el conocimiento de esta relación proporcional se mantuvo durante dieciocho siglos como una cuestión puramente matemática hasta que, en 1498, el matemático y humanista franciscano Fray Luca Pacioli la nombra *proporción divina* en su obra del mismo título impresa en 1509 (Cabezas y Ortega,



Figura 3. Representación de las líneas de dibujo de la Mandorla. En las capas profundadas *in situ* (imágenes de la derecha) pueden observarse las marcas de incisión de los puntos que corresponden al centro de las circunferencias a partir de las cuales se ha construido la mandorla.

³ *Los Elementos de Euclides* es la obra matemática griega que ha ejercido mayor influencia en toda época, ya que ha constituido la fuente principal del conocimiento matemático, el cuerpo de doctrina central de las ciencias matemáticas del que se puede derivar el resto, el principal vehículo de la transmisión del saber matemático básico a lo largo de los siglos (González Urbaneja, 2008: 125).

2002). El historiador Rudolph Wittkower considera un tópico o leyenda que los artistas del Renacimiento conocieran y utilizaran en sus obras la proporción o sección áurea y declara: «Cuando encontramos la sección áurea en el arte renacentista podemos decir con certeza que no fue utilizada deliberadamente. Y como prueba *a contrario* de esto que digo, está el hecho de que en ninguno de los centenares de estudios renacentistas sobre las proporciones humanas y arquitectónicas que he leído aparece el uso de la sección áurea o de cualquier otra magnitud irracional» (Wittkower, 1979: 537).

En la base de la realización del rostro de la *Maiestas Domini* volvemos a encontrar la figura geométrica del pentágono. Según Sendler, en época medieval, para la construcción de los rostros se utiliza la teoría de los tres círculos de Panofski, como se ha visto en los iconos bizantinos. El mejor argumento a favor de la aplicación de este esquema es el propio análisis de distintos rostros de pinturas murales románicas, en los que se ve claramente empleado. El rostro de la *Maiestas* responde bien a la utilización de la teoría de los tres círculos, pero su base geométrica parece llegar un poco más allá: se adapta a una estrella de cinco puntas con la misma orientación que la representada en uno de los esquemas de Villard de Honnecourt (figura 6).

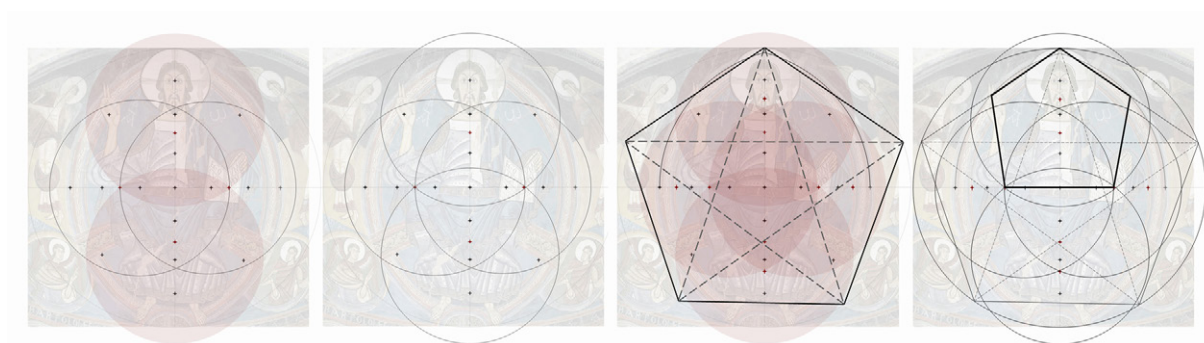


Figura 4. Secuencia de representación del pentágono a partir de modelos clásicos como el de Hippócrates. Se observa la coincidencia de líneas y puntos claves con la representación de las pinturas de Sant Climent de Taüll.

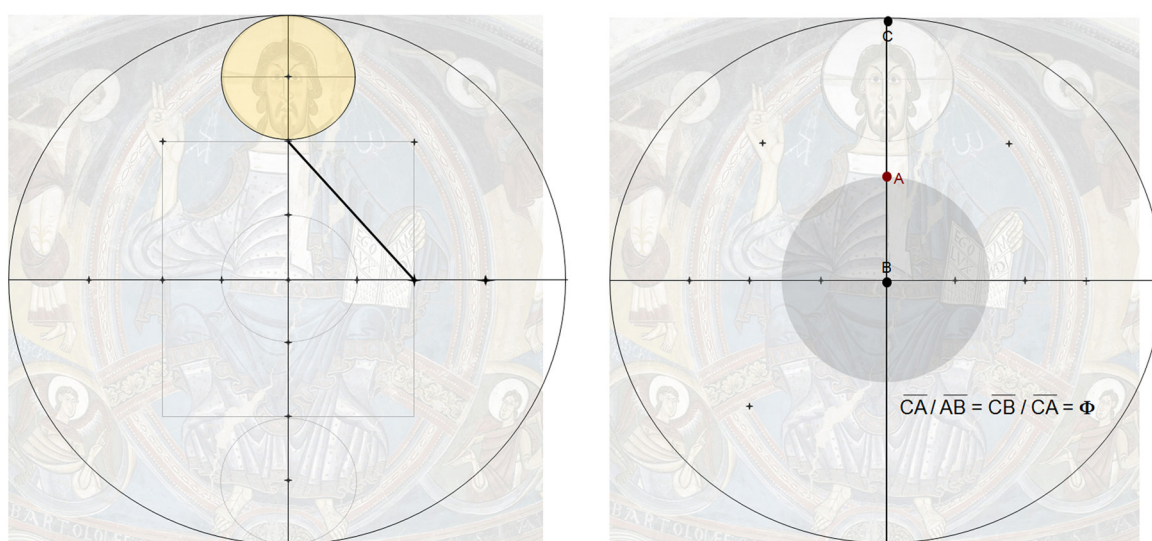


Figura 5. A la derecha, se representa en gris el círculo que une los distintos puntos que dividen el radio de la circunferencia inicial según la proporción áurea, es decir, de manera que $a/b = b/(a+b)$ lo que conduce a través de $b^2=a(a+b)$ conduce a la obtención del número irracional denominado fi, $\Phi = 1,618$. A la izquierda, se representa en amarillo el círculo que corresponde a 1/4 del diámetro de la esfera inicial. Se observa como la representación del libro que contiene la inscripción *Ego Sum Lux Mundi*, se adapta a las líneas geométricas que proporcionan estas dos medidas.

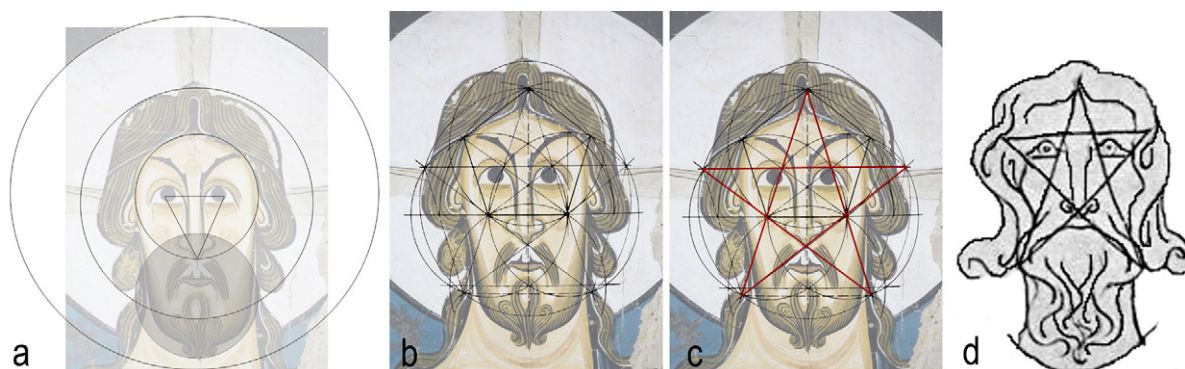


Figura 6. Base geométrica del rostro de la *Maïestas Domini*; a) superposición de tres círculos siguiendo la teoría de Panofski; b) superposición del diagrama de Hippócrates para la construcción del pentágono; c y d) comparación del rostro de la *Maïestas* con la reproducción de uno de los dibujos de Villard de Honnecourt (hoja 35, dedicada al arte de la *iométrie* o *géométrie*) (Cabezas y Ortega, 2002).

3.2. Dibujo

El dibujo preliminar en Sant Climent se encuentra sobre la capa de enlucido. El maestro de Taüll y su taller realizaron los morteros de la pintura mural con cal y arena, obtenidos en las proximidades del monumento donde trabajaron. Se distinguen dos capas: la primera, el *revoque*, en contacto con el soporte, más burda, con la función de igualar el muro; la segunda, el *enlucido*, más delgada, colocada con cuidado para recibir la policromía. En las pinturas originales traspasadas del museo, el estrato de enlucido es muy escaso, a causa del arranque a *strappo*. En el ábside, este mortero lo podemos ver en algunas zonas, como a la izquierda del apóstol San Jaime, en la columna que lo separa del inexistente apóstol San Felipe. Se trata de un área en la que el arrancamiento de la pintura debió de ser complicado –posiblemente por las humedades– y dejó a la vista la preparación.

Las jornadas de trabajo en la pintura sobre el muro estaban sometidas al tiempo de secado y a la climatología: el fragmento de enlucido húmedo se debía dibujar y policromar con agilidad para asegurar la carbonatación de los pigmentos. Las zonas de trabajo a las que accedía el pintor quedaban delimitadas por el espacio del que disponían con la colocación de los travesaños del andamio; así pues, los fragmentos de mortero coinciden con las *pontate*.

3.2.1. Procedimientos, herramientas e instrumentos

En la pintura mural la función del dibujo no era otra que la de facilitar la ejecución de la pintura. En el manuscrito de Montpellier, *Diversarum arcium* (c. 1300), se menciona que el método de dibujo sobre el muro es similar a la metodología empleada para la pintura sobre madera: «The method for drawing on walls, is the same as on wood, that is to say with an iron or steel stylus, or with a brush, and with a compass and with a ruler and with a string, or with a condermenia made from a page that is good» (Clarke, 2012: 218). Siguiendo los comentarios de Mark Clarke, entendemos aquí que el término *condermenia* puede hacer referencia al instrumento que usaba el artista para estructurar su trabajo y marcar los espacios donde tenía que dibujar las figuras. Con él ejecutaba las líneas horizontales y verticales que guiaban y definían espacialmente el dibujo. Consistía en una cuerda impregnada con pigmento de tierra roja que se sujetaba tensada en los dos puntos opuestos del muro donde se quería trazar la línea. Esta cuerda tensada se separaba por el centro y se soltaba golpeando la preparación blanda y consiguiendo la marca de la línea deseada con el pigmento en la pared, vertical u horizontal. En el ábside del Museu Nacional se ven fácilmente estas líneas de color rojo que delimitaban la

composición. Son visibles restos de pigmento rojo en horizontal y vertical. En la zona inferior del semicilindro la línea se utiliza con el fin de separar los colores utilizados en el fondo de las figuras de los apóstoles. En este registro hay multitud de casos en los que se utiliza este instrumento para marcar las líneas verticales que construyen, por ejemplo, las columnas que dividen el espacio entre las diferentes figuras masculinas y la virgen⁴ (figura 7). En los trabajos en la iglesia también se encontraron restos de estas guías de pigmento rojo.

En las fases preparatorias de la pintura mural, además de las líneas en vertical y horizontal, el pintor se ayudaba del compás. Al igual que la línea recta, el compás formaba las circunferencias y ayudaba a definir espacios como las aureolas o arcos, que de columna a columna marcaban el semicilindro bajo el cual se encuentran los apóstoles y la virgen. Este instrumento tan sencillo podía realizarse con una cuerda de las medidas necesarias: se fijaba a un extremo con los dedos o con un utensilio puntiagudo y al otro con movimiento circular

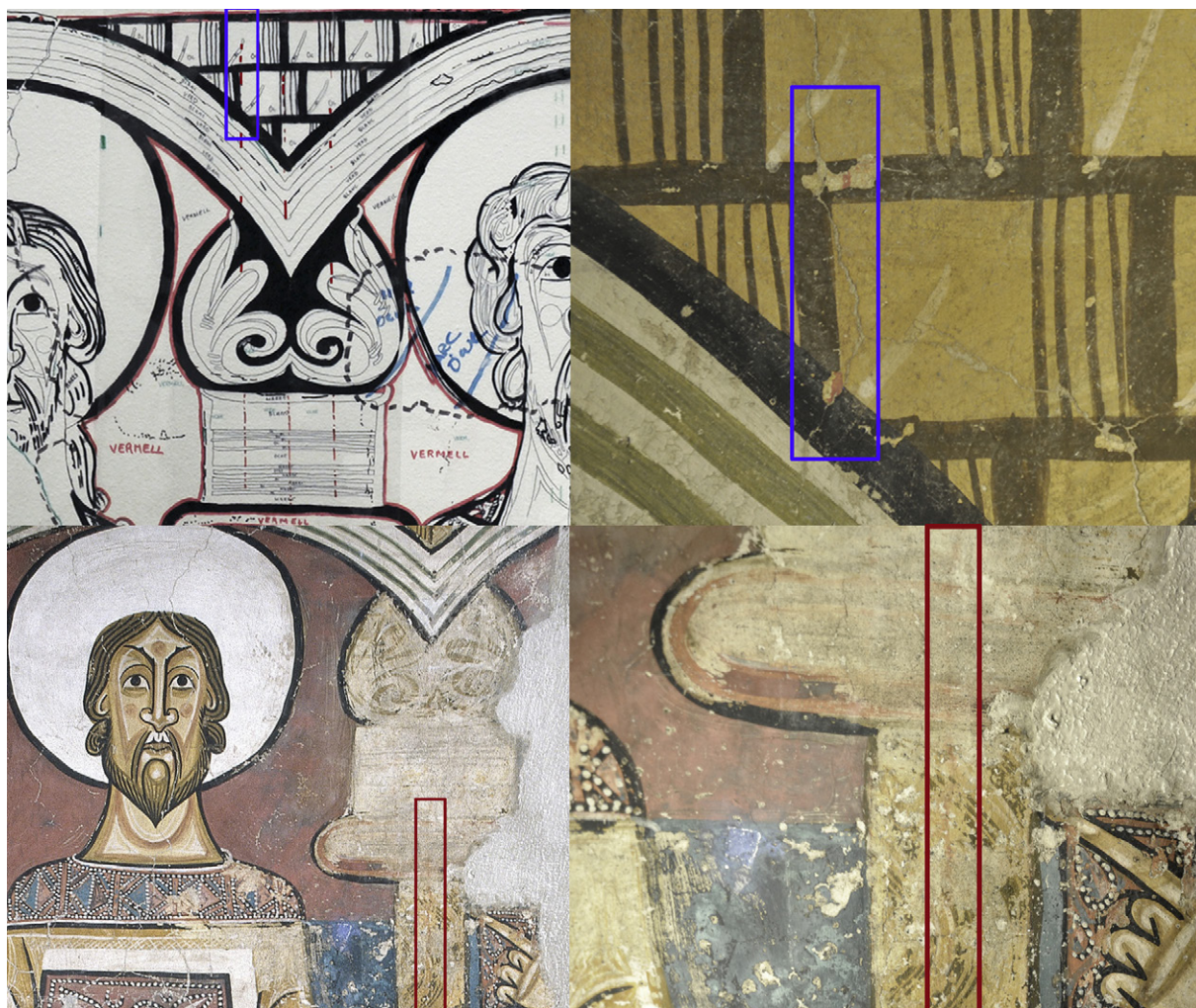


Figura 7. Localización de las líneas trazadas con la cuerda y pigmento rojo. En las columnas se ven hasta tres trazos verticales que marcan la línea del centro de la pilastra y las dos paralelas que señalan el ancho de las mismas. Las líneas verticales no se limitan a la columna, sino que continúan hacia arriba hasta la línea de incisión horizontal con los nombres del Apostolado. Se hace visible el trazo rojo de la cuerda en una zona con pérdida de policromía, debajo del dibujo de los ladrillos.

⁴ Los apóstoles, en el ábside, son, de izquierda a derecha (visto por el espectador): santo Tomás, san Bartolomé y la Virgen antes de la ventana central. San Juan y san Jaime en la derecha. San Felipe, inexistente, se encuentra al lado de san Jaime ya que existen las letras con su nombre. El resto de los apóstoles se ubican en el arco triunfal mayor.

pintaba la línea con color o realizaba una incisión sobre el enlucido. Existen muchas muestras de trabajo con compás en Sant Climent de Taüll, por ejemplo, las aureolas y las circunferencias del *tretramorfos* donde se representan el ángel con el símbolo de San Marcos, el león, y el ángel con el símbolo de san Lucas, el toro. Se han detectado las marcas de las puntas de compás en los centros de estas circunferencias (figura 8).

Los círculos interiores tienen un diámetro entre 73 cm y 75 cm, mientras que los exteriores tienen entre 83 y 85 cm. En la operación de arranque y traspaso de pintura mural es fácil que las medidas se modifiquen ligeramente, porque los fragmentos sufren puntuales cambios dimensionales con motivo de la contracción y dilatación que soportan en el proceso para recuperar su superficie. En el caso del león, la punta para iniciar la circunferencia de la aureola se encuentra entre sus ojos. Mediante programas de imagen, hemos superpuesto los círculos que encierran los ángeles que representan a dos evangelistas, Marcos y Lucas. Pudimos concluir que las medidas fueron prácticamente las mismas: En consecuencia, el maestro utiliza dos largos de cuerdas diferentes: una para trazar las circunferencias interiores y otra para las exteriores. Mientras que las



Figura 8. Arriba, localización de las marcas de las puntas de compás que permiten el trazo de las circunferencias del Tetramorfo. En el león encontramos la punta de compás de las dos circunferencias situada encima del ala desplegada encima del lomo, a la altura de la boca. El ángel que lo acompaña muestra el agujero en su pecho debajo de la línea negra sobre fondo ocre, a la altura del centro de su garganta. En el toro, la punta está marcada en el cuello, prácticamente tocando el ala. En el ángel que lo acompaña, la marca es evidente en los pliegues superiores de la túnica, cerca de su hombro derecho. En el centro, se evidencia los dos largos de cuerda para los círculos interiores y los exteriores. Abajo, muestra como con compás y desde la boca de las figuras del registro inferior, el artista trazó las curvas de la arquitectura

aureolas de los ángeles tienen un diámetro de 27 cm, las aureolas del león y del toro son ligeramente más grandes (32 cm x 30 cm), probablemente por su importancia iconográfica (figura 8). En las bocas de las figuras del Apostolado, realizadas con incisión, encontramos los puntos para realizar las circunferencias de los arcos que finalizan en los fustes de las columnas.

La incisión es un tercer procedimiento detectado utilizado por el maestro de Taüll en el momento de marcar las guías para pintar. Sobre el enlucido, el artista marcaba con un instrumento punzante el dibujo realizado a tamaño natural. Hay trazos del dibujo incisos sobre la pared a mano alzada, como en las bocas de las figuras del apostolado y la virgen. David Winfield comenta que la función de estas líneas es perpetuar los trazos de dibujo realizados a pincel, escondidos muchas veces bajo capas de color, y que se encuentran en pinturas tanto del mundo clásico como en la pintura bizantina, y añade: «and if they appear to be of exceeding rarity in Romanesque wall paintings, I feel convinced that this is primarily because they simply have not been observed» (Winfield, 1968: 97). Los ejemplos más visibles son las zonas donde se encuentran san Marcos o san Lucas (figura 9). Las incisiones horizontales estructuraban el espacio en el que se iba a intervenir. Así, encontramos un buen ejemplo en la franja horizontal negra que separa la semicúpula y el semicilindro del ábside, donde el artista escri-



Figura 9. Imágenes superiores: ejemplo de incisión en forma curva en la aureola del ángel que acompaña al toro (San Lucas). Imágenes inferiores: Incisiones a mano alzada en las bocas de las figuras del registro Apostólico: boca de San Juan (luz rasante) i de la Virgen (luz visible y RTI).

bió los nombres de las figuras del registro inferior. La línea incisa en muchas ocasiones queda visible una vez policromada, como queda reflejado en los casos mencionados.

El dibujo preliminar del ábside es visible tanto en las capas profundas de la pintura que queda *in situ*, como en zonas con pérdida de policromía de las pinturas conservadas en el Museu. Se observan trazos realizados con pincel de una tonalidad verde muy variable, prácticamente negras en ocasiones. Las secciones estratigráficas de muestras con estas líneas de dibujo permiten observar que contienen una mezcla de ocre amarillo y negro, en distintas proporciones según los puntos de extracción (figura 10). Si bien en los textos medievales las instrucciones para dibujar sobre el muro no son concretas, tanto Cennino Cennini como Dyonisius de Fournas⁵ relatan el procedimiento y coinciden en realizar primero un esbozo con ocre diluido sin temple, que cuando es definitivo se repasa con negro, tal como se procedía con el dibujo en otros soportes. Cennini, además, menciona la mezcla de ocre amarillo y negro (denominada *verdaccio*), concretamente cuando da instrucciones para dibujar rostros⁶, y en el capítulo LXXI escribe: «Volvamos ahora a la pintura al fresco sobre el muro. Quieres pintar una vestimenta del tipo que sea: antes debes dibujarla con verdacho sin que el dibujo se vea demasiado» (Brunello, 1988: 121).

3.2.2. Modelos y patrones

En el arte románico se formalizaban las composiciones con modelos iconográficos de distintas procedencias. Los artistas adaptaban estos repertorios de dibujos y los reproducían de manera personal. Debido al carácter nómada de los talleres, sus diseños viajaban de un lugar a otro.

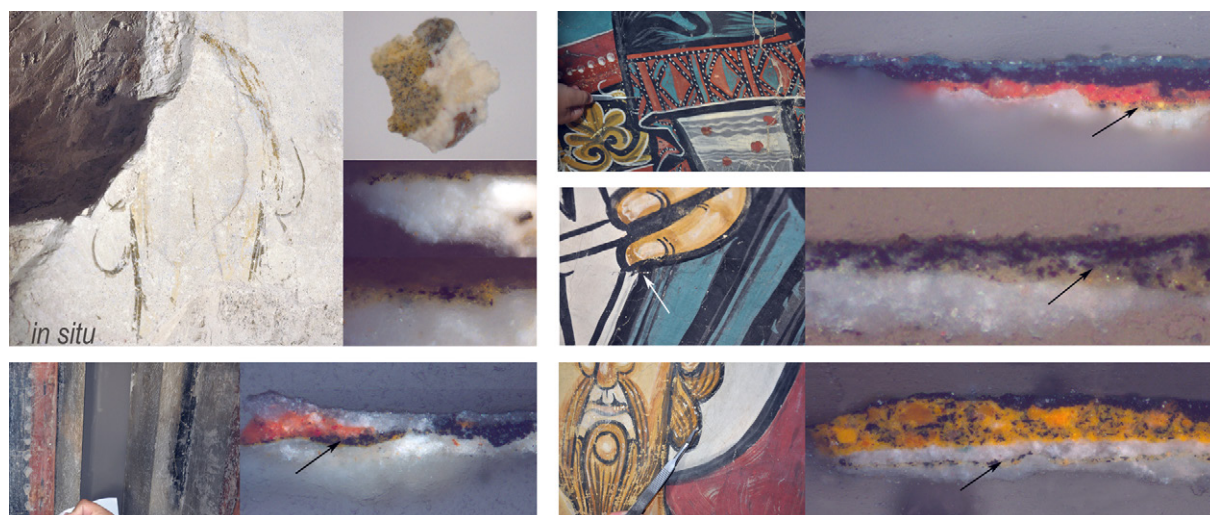


Figura 10. Imágenes de microscopía óptica de muestras extraídas de zonas con líneas de dibujo. En las secciones estratigráficas se señala la localización del estrato correspondiente a estas líneas, donde se observa la mezcla de pigmentos negro y ocre amarillo.

⁵ «When you have marked the proportions of the figure take some ochre and draw first with a watery solution; later go over it with the same ochre and if the drawing does not go right go over it with off-white; inscribe the haloes and polish the background well and at once apply the black» (Hetherington, 1990: 12).

⁶ «... toma un poco de negro (el equivalente a una lenteja) y mézclalo con ocre. Toma el equivalente a un tercio de haba de blanco de San Juan [...] y mezcla todos los colores citados. Añádeles agua limpia para conseguir un color bastante líquido. Toma entonces un pincel fino de cerdas suaves, que quepan en un canutillo de plumas de oca, y con ese pincel dale expresión al rostro que quieras pintar, deslizando sobre él tu pincel casi seco, muy ligeramente mojado en este color, que se denomina *verdaccio* en Florencia y *bazzè* en Siena» (Brunello, 1988: 116).

Es habitual en el periodo románico encontrar modelos, sean figuras o partes de ellas, que se parecen mucho cuando el mismo taller las ha llevado a cabo⁷. Incluso dentro de la misma pintura, los modelos se repetían cambiando en ocasiones las dimensiones, o bien la disposición de las caras, narices, cabellos, ojos, manos, pies, vestidos... El estudio realizado en Sant Climent demuestra la utilización de plantillas y modelos⁸. Encontramos parecidos significativos entre los dos ángeles que acompañan los símbolos de san Lucas y san Marcos, en el cabello y en el perfil. Asimismo, también hay gran similitud entre San Mateo y el ángel que acompaña el símbolo de san Marcos, en el cabello, en los ojos y en las cejas. Para realizar las cabezas de los apóstoles santo Tomás y san Jacob, se utilizó la misma plantilla y, además, con un evidente parecido con la cabeza de la propia *Maiestas Domini*, aunque de distinto tamaño (figura 11). Y finalmente, queremos destacar la coincidencia en forma y dimensiones de la mano de Cristo que bendice con la mano de Dios que se encuentra en el arco triunfal (figura 11). Estas comparaciones se han llevado a cabo con softwares de tratamiento de imagen, y superponien-



Figura 11. Superposición de las líneas de dibujo de los rostros de San Tomás y San Jacob y comparación con el rostro (reducido) de la *Maiestas Domini*. En la parte inferior, la comparación de las líneas de dibujo permite observar como la mano que bendice del Cristo en Majestad es igual que la Mano de Dios ubicada en la zona más alta del arco triunfal.

⁷ Encontramos otros ejemplos del repetido uso de patrones como el trabajo realizado por el maestro de las pinturas de San Quirze de Pedret, Santa María d'Àneu y San Litzier de Collsarans en Francia. O las similitudes encontradas entre las figuras de la Crucifixión de Sorpe y las de Santa Eulalia d'Estaón (Pagés, 2009).

⁸ Llamamos *patrón* a la figura que el artista repite con regularidad y que no varía de dimensiones. Llamamos *modelo* a esa misma figura, cuyas dimensiones varían.

do y girando manualmente los calcos realizados en el Museu Nacional y los elaborados en Sant Climent de Taüll en el año 2013.

Hay distintas propuestas en cuanto al material con el que se realizaban las plantillas para agilizar el trabajo del pintor. Se trata de un tema todavía no resuelto. Nimmo y Olivetti hacen referencia a la *carta oleata* descrita tanto por Dionisius de Fournia como por Cennini. Guardia opina que posiblemente las realizaban con corteza de abedul, ya que era un material fácil de preparar, transportar y enrollar para su traslado. Los bosques de abedul abundan en el Pirineo catalán, mientras que el pergamino y la tela podían suponer soportes demasiado caros (Guardia, 2016: 168).

3.3. Policromía

3.3.1. La técnica

En el *El libro del Arte*, Cennino Cennini se hace eco de la transformación de la pintura mural que llevaron a cabo Cavallini i Giotto durante el *Trecento*. En el capítulo LXVII, «De cómo trabajar en muro, al fresco, y en qué orden, y cómo pintar o colorear un rostro», escribe Cennini: «Calcula cuánto puedes trabajar al día, pues todo lo que empieces a enlucir debes terminarlo. Es cierto que a veces en invierno, con tiempo húmedo, trabajando sobre muros de piedra, el enlucido dura de un día para otro; pero, si puedes, no remolonees, porque trabajar al fresco significa seguir un ritmo rápido, pues el temple de un día es el más fuerte, el mayor y más agradecido trabajo que se pueda hacer. Así pues, enluce un trozo de la pared, formando una capa lisa y fina sobre la imprimación inicial» (Brunello, 1988: 115). En este párrafo queda plasmada la preocupación existente por el tiempo de secado del mortero de cal, lo cual se refleja en las *giornatas* características del *Fresco Buono*. Este periodo de tiempo, entre seis y ocho horas, en el que las condiciones de humedad facilitan que el proceso de carbonatación sea óptimo, ha sido denominado por algunos autores *golden hour* (Piovesan, Mazzoli i Maritan, 2012). No obstante, la reacción química que tiene lugar entre el dióxido de carbono atmosférico CO_2 y la cal apagada Ca(OH)_2 puede tener lugar muchas horas después (Elert *et al.*, 2002), favorecida, eso sí, por la presencia de agua, que facilita la disolución del gas CO_2 en la superficie del mortero para que acabe reaccionado con el calcio de la cal apagada, formando partículas sólidas de carbonato de calcio, CaCO_3 , que interconectadas entre sí forman una matriz que atrapa los pigmentos, endureciendo la pintura y fijándola al muro.

Si recuperamos textos más antiguos y más cercanos al siglo XII, fecha de creación de las pinturas de Sant Climent de Taüll, no se hace evidente esta preocupación por el tiempo de secado. En *De diversis artibus* el monje Teófilo se refiere a la pintura mural en el capítulo XV, recomendando incluso echar agua sobre un muro cuando esté seco. Estas son sus palabras: «Cum imagines vel aliarum rerum effigies pertrahuntur in muro sicco, statim aspergatur aqua tamdiu, donec omnino madidus sit. Et in eodem humore liniantur omnes colores qui supponendi sunt, qui omnes calce misceantur et cum ipso muro siccentur, ut haereant»⁹ (Theophilus, 1961: 13). Teófilo también hace referencia en otras partes del tratado a pintar sobre un muro, concretamente cuando describe el color *prasinius*¹⁰, en el capítulo II: «Qui prasinus est quasi confectio quaedam habens similitudinem viridis coloris et nigri, cuius natura talis est, quod non teritur super

⁹ «Cuando las imágenes o reproducciones de otras cosas se pintan en un muro seco, inmediatamente échale tanta agua hasta que esté completamente mojado. Y en esta misma humedad extiende todos los colores que quieres aplicar, los cuales todos ellos han de mezclarse con cal y han de secarse conjuntamente con el muro para que queden bien fijados.»

¹⁰ «El color *prasinius* es una preparación que tienen aspecto de color verde mezclado con negro, la naturaleza del cual es tal que no se tritura sobre una piedra, sino que se disuelve en agua y se cuele con cuidado con un trapo, la utilización de este pigmento en lugar de verde en un *muro fresco* se considera adecuada».

lapidem sed missus in aquam resoluitur et per pannum diligenter colatur; cuius usus in recenti muro pro viridi colore satis utilis habetur» (Theophilus, 1961: 5). La expresión *recenti muro* que aparece aquí ha sido traducida por muchos autores como *muro fresco*. Según David C. Winfield, esta traducción es correcta y, por tanto, rebate el argumento¹¹ de que Teófilo solo describe y conoce la pintura al seco, como podría deducirse del capítulo xv. Winfield afirma que ha encontrado evidencias que muchos pintores bizantinos y medievales iniciaban sus trabajos al fresco. Comenta que el fresco era la manera de pintar propia de la Alta Edad Media, fruto de la herencia de los procedimientos clásicos descritos por Vitruvio y Plinio, y que esto se refleja tanto en el *Mappae Clavicula* como en el manuscrito de *Lucca*, donde se describe la pintura mural como *simple*¹² en comparación con técnicas sobre otros soportes, porque en ella los pigmentos no hay que mezclarlos con cera o con cola de pescado, sino solo con agua. La interpretación de que la pintura mural alrededor del siglo xii era iniciada al fresco y terminada al seco, según opinión de Winfield, se ve reforzada por otro pasaje del tratado de Teófilo: «Todos los colores que se ponen debajo de otros en un muro, mézclalos con cal para una mejor consistencia» (Winfield, 1968).

Encontramos instrucciones muy parecidas para pintar sobre el muro también en el manuscrito de Montpellier, *Liber diversarum Artium*. En el libro 3 aparecen las instrucciones para pintar muros y techos¹³. Clarke comenta el contenido de estos capítulos concluyendo que relatan un proceso totalmente paralelo al procedimiento descrito en *Hermeneia*: se humedece un muro seco, y los pigmentos de la primera capa se mezclan con agua de cal antes de su aplicación; estos secan a la manera del *fresco*; y finalmente se aplican al *secco* capas de pintura aglutinadas con yema de huevo (Clarke, 2011: 215). Nimmo y Olivetti también afirman que las dos técnicas coexistían durante la Edad Media, y que una integraba la otra: «si iniziava a fresco, a garanzia della durata del dipinto, e se rifiniva a secco là dove non s'era riusciti a terminare» (Nimmo y Olivetti, 1987: 401).

De hecho, el propio Cennini LXXVII recuerda en el capítulo: «Y observa que todo lo que trabajas al fresco debe ser terminado y retocado en seco con temple» (Brumello, 1988: 128). Fue Vasari quien consideró que el retoque en seco de los frescos era algo vil, según comenta Tambroni¹⁴. Así pues, el concepto de *buen fresco* utilizado durante el Renacimiento no parece adecuarse a las prácticas recomendadas en época medieval, donde podría hablarse de un único concepto genérico de pintura sobre el muro.

Una forma de determinar la técnica pictórica (seco o fresco) de las distintas capas de una pintura mural puede ser la identificación analítica de materia orgánica que actúe como aglutinante de los colores aplicados al seco. En el caso del conjunto de Sant Climent de Taüll esta identificación se dificulta por los materiales añadidos durante el arranque de su lugar de origen con cola de origen animal, y el traspaso a un nuevo soporte con caseinato de calcio. Para ayudar a evaluar la técnica se ha creado una colección de patrones con diferentes casuísticas (frescos y secos con distintos aglutinantes) para observar con microscopía electrónica SEM-EDX qué distribución presenta el catión calcio entre las diferentes capas (mortero y pictóricas), en una sección estratigráfica. Se ha observado que cuando se aplica pintura sobre un mortero

¹¹ Argumento defendido por Berger. Su opinión ha sido aceptada por Loumyer, Herringham, Thompson, Eibner, Tintori y Meiss.

¹² En el *Mappae Clavicula* aparece la frase «ista memoramus omnium operationes, qui in parietibus simplicem, in ligno cere commixtum suscepit lignum simplicem cum unctione collon commixtum», y en el *Lucca Manuscript* aparece «Ita memoramus omnium operationes qui in parietibus simplice, in ligno cere commixtis coloribus in pellibus ictiocollon commixtum».

¹³ «Now, on damp walls paint with water bitter from lime. For all colours which are placed under others on walls [i.e. first layers], mix with lime, for the purpose robustness, tempered in this way. Under azure and menisch is applied veneda, i.e. white mixed with black: under grenn [is applied] ochre mixed with black; under cinnabar [is applied] minium mixed with lime-water; under all other colours [use] the same colour mixed with lime [-water]» (Clarke, 2011: 143).

¹⁴ Comentario de Giuseppe Tambroni, autor del libro *De Cennino Cennini Trattato della pittura sacado a la luz por primera vez con anotaciones del Caballero Giuseppe Tambroni*. Ed. Salviucci, Roma, 1821, reproducido por Brunello (Brunello, 1988: 128).

seco (1 mes) aparece sobre éste, justo debajo de la pintura, una línea o banda de acumulación del catión Ca, que se relaciona con la formación de carbonato de calcio, CaCO_3 . Cuando la pintura se aplica sobre un mortero todavía húmedo (1 hora) la línea de acumulación de Ca aparece por encima del estrato pictórico (Oriols, Osmond y Marquès, 2015).

En las muestras con el mortero húmedo, el dióxido de carbono atmosférico, CO_2 , se disuelve en el agua retenida entre las partículas superficiales, mientras tiene lugar la migración del catión calcio de la cal apagada [hidróxido de calcio Ca(OH)_2] hacia la superficie. Así pues, la formación de carbonato de calcio va creciendo desde la superficie hacia el interior de la pintura. Mientras no se consuma todo el reactivo de Ca(OH)_2 la reacción de carbonatación puede ir avanzando. No obstante, la propia formación de partículas de CaCO_3 hace disminuir el tamaño de los poros superficiales y dificulta la disolución de más dióxido de carbono, ralentizando la reacción. Esto explicaría la formación de estas bandas o líneas superficiales con acumulación del catión Ca. El avance de la carbonatación también puede verse frenado por la evaporación del agua, favorecida por el aumento de la temperatura que comporta la propia reacción. En el caso de añadir más agua, la reacción podría reiniciarse. En las pruebas realizadas, no obstante, no se ha buscado el objetivo de distinguir si los pigmentos estaban mezclados solo con agua o con agua de cal.

Los mapas SEM-EDX de distribución del elemento Ca obtenidos de secciones estratigráficas de muestras de la pintura de Sant Climent de Taüll (figura 12) son coherentes con las descripciones de la técnica de pintura sobre el muro de los tratados medievales. Se observa la aplicación de una primera capa sobre un mortero húmedo, y las últimas capas aplicadas al seco, ya sea con aglutinantes orgánicos, ya sea con agua de cal cuando el pigmento es compatible. En la mayoría

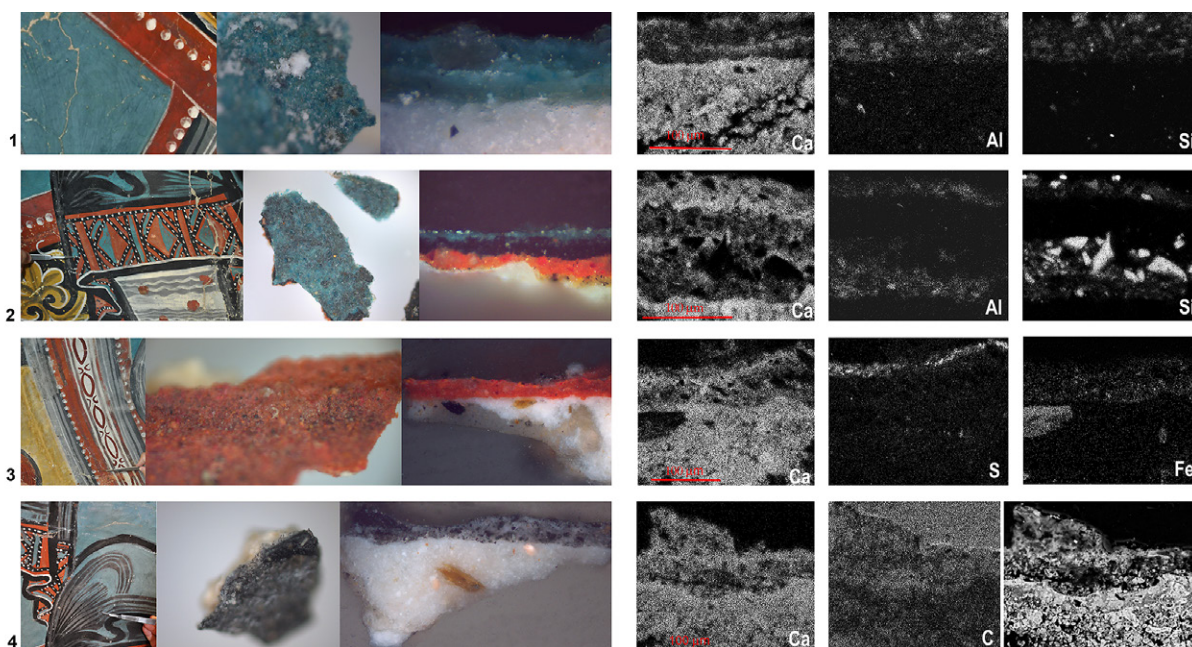


Figura 12. Mapas SEM-EDX de distribución de elementos obtenidos sobre la sección estratigráfica de cuatro muestras del ábside de Sant Climent de Taüll. En la primera muestra (1) se observa una doble línea de acumulación de Ca, justo encima de cada uno de los dos estratos pictóricos azules (aerinita), tal como ocurre con patrones de referencia realizados sobre morteros frescos. Esta doble línea también se observa en la muestra negra (4) si bien la cantidad de Ca en el estrato pictórico es superior, probablemente por la mezcla de negro con blanco, como corresponde al color *veneda*. El azul (aerinita) de la muestra 2 se ha aplicado al seco, mezclado con agua de cal y, por tanto, observamos una ancha banda de Ca que ocupa todo el estrato pictórico. En la muestra del rojo de la Mandorla (3) se observa la fina línea de acumulación de Ca, por encima de las capas de ocre rojo (que contienen Fe) y justo por debajo del acabado superficial con minio y cinabrio (relacionado con el elemento S).

de muestras analizadas se observa la superposición de dos y hasta tres capas (figura 12). Estas terceras capas siempre son al seco y corresponden a las decoraciones más minuciosas del conjunto pictórico. En concreto, en el caso de la imagen central de la mandorla con la *Maiestas Domini*, la superposición de capas observada es la siguiente (figura 13):

1. Líneas de dibujo que contienen la mezcla de negro y ocre.
2. Primeras capas, o colores de base, realizadas sobre mortero húmedo: ocre amarillo para las carnaciones y otros detalles como el asiento de la *Maiestas*; negro para el vestido y líneas de la mandorla; azul para el fondo de la mandorla; ocre rojo para la mandorla y otros detalles del vestido.
3. Segundas capas: azul para el vestido y fondo de la mandorla, ocre rojo para las líneas de la mandorla, medios tonos oscuros de los distintos colores y rojo hematites para los detalles de la mandorla.
4. Terceras capas al seco: negro para las líneas de perfil y otros detalles, blanco para las luces, mezcla de minio y cinabrio para los detalles decorativos del vestido y para las pinceladas superpuestas a las líneas rojas de la mandorla y azul para los detalles del vestido.

3.3.2. El color

Sorprende la riqueza cromática de las denominadas capas profundas, conservadas *in situ*, de la pintura de Sant Climent de Taüll recientemente descubiertas al público después de su restauración (Marqués, 2016). El arranque a *strappo* separó las segundas y terceras capas de esta pintura, dejando buena parte de las capas de base, que son mayoritariamente los colores que continúan en el muro del ábside original (figura 13).



Figura 13. Esquema de la superposición de capas pictóricas en la representación de la *Maiestas Domini*. Se observa como las primeras capas de color son las que han quedado *in situ*, en las denominadas capas profundas. En las secciones estratigráficas se observa como existe una segunda capa de azul en el fondo de la Mandorla, y una segunda capa de rojo en las líneas de ésta (acabadas con una tercera capa de minio y cinabrio). Destacamos la presencia de restos de hojas de estaño, Sn, aplicadas en seco sobre la cruz del nimbo.

El color más característico y genuino de estas pinturas es el azul. Se trata de un azul local, el mineral aerinita, un silicato fibroso originario del Pirineo. La forma como se aplica este color en el taller de Taüll no es totalmente fiel al tratamiento común que se daba a los azules en época medieval. Los tratados recomiendan aplicar el *lazure* al seco, aglutinado con huevo, sobre fondos negros (*veneda*). La azurita, por ejemplo, uno de los azules más utilizados en época medieval, debe aplicarse, necesariamente, al seco, porque ennegrece en contacto con el hidróxido de calcio. Contrariamente, la aerinita es compatible con la cal apagada y, por tanto, puede aplicarse tanto al fresco como al seco, mezclándola con agua de cal. De hecho, en las pinturas de Sant Climent se encuentra aplicada de estas dos formas (figura 12). El maestro de Taüll pinta con azul sobre negro en el manto de la *Maiestas Domini* y en otros registros, pero al lado, en el fondo de la mandarla, encontramos dos capas de azul aplicadas directamente sobre el mortero blanco. Probablemente esta circunstancia responda a una intención de buscar cierto contraste cromático en el proceso de construcción del color. La forma particular con la que se emplea este azul evidencia un buen conocimiento del comportamiento del pigmento aerinita con la cal. Son muchas las pinturas del románico catalán que contienen el azul aerinita aplicado al fresco (Palet y De Andrés, 1992; Salvadó *et al.*, 2008). En estas pinturas, a menudo la aerinita se halla sobre fondos negros, como recomiendan los tratados medievales (tabla 1), aunque en ocasiones, se encuentra también directamente aplicada sobre el blanco del mortero (Marqués y Oriols, 2014).

Tabla 1.
Comparación entre los pigmentos identificados en Sant Climent de Taüll y las recomendaciones de los tratados

Blanco	
Teófilo	Cretam (carbonato de calcio) o calcem (hidróxido de calcio).
Manuscrito Montpellier	Creta o cal.
Cennino Cennini	Carbonato de calcio denominado <i>Bianco San Giovanni</i> .
Dionysius of Fourn	Blanco de cal. Carbonato de calcio obtenido bien de un viejo horno de cal, bien de un mortero de pintura mural, o calcinando la misma cal apagada con la que se trabaja.
Sant Climent de Taüll	Carbonato de calcio con presencia de sulfato cálcico y del elemento Sr.
Amarillo	
Teófilo	Debajo del ocre y el tornasol, los mismos colores mezclados con cal.
Manuscrito Montpellier	El oropimente no se utiliza en los muros, en su lugar se usa ocre amarillo.
Sant Climent de Taüll	Ocre amarillo (goethita).
Azul y verde	
Teófilo	Bajo el azul y verde, se pone una capa de <i>veneda</i> que es una mezcla de negro y cal. El azul se aplica con temple de yema de huevo. El verde se mezcla con saba y negro.
Manuscrito Montpellier	El azul se prepara con cola de pescado y se aplica con una gota de yema de huevo. Se aplica el verdigrís con agua de cal. Debajo del azul y <i>menisch</i> se aplica el <i>veneda</i> . Bajo el verde se aplica ocre mezclado con negro.
Dionysius of Fourn	Recomienda asegurarse de que el muro está seco cuando se aplica el <i>lazouri</i> .
Sant Climent de Taüll	Azul: aerinita aplicada, en ocasiones, sobre negro y, en ocasiones, aplicada sobre la base del mortero. Verde: mezcla de azul y ocre amarillo aplicados sobre la base del mortero.
Rojo	
Teófilo	Debajo del cinabrio, el rojo
Manuscrito Montpellier	Mezclar el cinabrio con huevo y agua. Debajo se aplica minio (o rojo) con agua de cal.
Dionysius of Fourn	No recomienda la utilización del cinabrio en el exterior porque puede ennegrecer.
Sant Climent de Taüll	Ocre rojo, hematites, cinabrio y minio.

En cuanto al color rojo, debemos destacar aquí la riqueza de recursos utilizados por el taller de Taüll. Utilizan distintos pigmentos de una forma jerarquizada. Se aplica el ocre rojo –de tonalidad anaranjada– para las capas de base o internas. En cambio, se usa el rojo hematites –de tonalidad morada– para elementos iconográficos más destacados, como los vestidos de los apóstoles, y en superficie, para pequeños detalles como la cenefa roja sobre blanco de las líneas de la mandorla. Encontramos distintas mezclas de minio y cinabrio (al seco) en los detalles decorativos de los vestidos y, de forma muy superficial, casi a modo de veladura, sobre otros rojos. La tonalidad actual de la mezcla minio-cinabrio no es exactamente la original, porque el minio está químicamente alterado. En ocasiones, sobre todo en los vestidos de las figuras, el uso de estos tres rojos sigue las pautas de la terna cromática, descrita más adelante.

A partir de los pigmentos puros, el maestro de Sant Climent de Taüll realiza mezclas para obtener nuevos colores y tonalidades. Consigue el verde a partir de la mezcla de aerinita con ocre amarillo. En muestras procedentes del marrón de los cabellos, se ha determinado la mezcla de ocre amarillo, ocre rojo y negro, que coincide con la instrucción que da el manuscrito de Montpellier para la representación del cabello de personajes jóvenes¹⁵. En otros marrones se ha determinado además la presencia de alguna partícula de rojo cinabrio que podría coincidir con la formulación del color *posc* dada por Teófilo.

En todos los rostros –pintados de forma bastante sistemática– se observa una policromía rica en matices. Sobre un fondo de carnación (realizado con la mezcla de ocre amarillo y carbonato de calcio) aparece una superposición de distintos tonos de sombra, localizados en el contorno de la cara, alrededor de los ojos, en la nariz, en la boca, en las arrugas del cuello y, con forma circular, en los pómulos, en la frente y en el mentón. El análisis de los tonos más rojizos de estas sombras ha evidenciado la presencia de una fina capa con ocre y cinabrio aplicados sobre la base de carnación, lo cual coincide con la descripción de los tonos *rosa* que hacen los tratadistas medievales. Las pinceladas que definen las luces de los rostros y manos están hechas con carbonato de calcio. En general, la policromía de las carnaciones de las figuras de Sant Climent de Taüll (figura 14) sigue pautas coincidentes con las instrucciones que da Teófilo para ello, utilizando los colores *membrana*, *posc*, *rosa* y *lumina* (tabla 2).



Figura 14. Rostros de San Jacob, de la *Maiestas Domini* y de San Juan, pintados de forma sistemática respecto a los trazos de luces y sombras con los colores *posc*, *rosa* y *lumina*. En las secciones estratigráficas se observa el color de base de la carnación (*membrana*) recubierto en las zonas de sombra rojiza por una mezcla que contiene cinabrio.

¹⁵ «Ochre, red and black are mixed, and the hair of youths is filled in; and it is defined with black, and lightened with the second [highlight]» (Clarke, 2011: 124):

Tabla 2
Descripción de los procedimientos para realizar carnaciones en distintos tratados

De Diversis Artibus, Teófilo

Tono base	El color carne, <i>membrana</i> , en el muro se forma a partir de ocre, cinabrio y cal. El <i>posc</i> de este, el rosa y las luces, <i>lumina</i> , se hacen de la misma manera que en el resto de técnicas.
Tono claro	<i>Lumina</i> . Añadir blanco, carbonato de calcio.
Tonos oscuros	Primer rosa. Mezcla del color carne con cinabrio y muy poco minio. Se aplica a la mandíbula, boca, mentón inferior, cuello, arrugas de la frente moderadamente, a lo largo de la nariz, articulaciones y en el resto de los miembros de un cuerpo desnudo.
	Primer <i>posc</i>. Cuando hayas mezclado el color carne y rellenado caras y cuerpos, añade <i>prasinius</i> y ocre rojo y un poco de cinabrio, y prepara el <i>posc</i> . Se utiliza para perfilar cejas, ojos, nariz, boca, barbilla, temples, las arrugas de la frente y del cuello, contorno de la cara, barba de los jóvenes, dedos de las manos y los pies y todas las partes que se distinguen en un cuerpo desnudo.
	El segundo <i>posc</i> y el segundo rosa son las mismas tonalidades más oscuras, por contener más <i>prasinius</i> o más cinabrio.

The Montpellier Liber diversarum arcium

Tono base	Blanco y verde y un poco de ocre y sinopia.
Tono claro	<i>Lumen</i> : ochre y <i>Sutra</i> . Ocre claro: ocre y blanco.
Tono oscuro	<i>Sutra</i> : negro y cinabrio. Es equivalente al color <i>Exudra</i> de Teófilo. <i>Umbra</i> : verde y ocre. Rosa: sinopia y blanco.

El libro del Arte, Cennino Cennini

Tono base	Toma ante todo un pocillo; echa en él poca cosa: blanco de san Juan y cinabrés claro a partes iguales.
Tono claro	Después toma tres pocillos, en los cuales dividirás en tres partes la encarnación, que serán: la más oscura como la mitad más clara de dicho rosa, y las otras dos proporcionalmente más claras.
Tono oscuro	

The Painter's Manual, Dyonysius of Fourna

Tono base	Mezcla de blanco de cal con ocre de Thasos y bol.
Tono oscuro	Para el tono medio de la encarnación, este se mezcla con el color de las capas subyacentes.

La mezcla de colores era habitual en época medieval. Ya desde el *Mappae Clavicula* se describe la técnica de los tres tonos (o terna cromática) para representar los objetos. A partir de la creación de un tono de base, este se aclara (matizare) o se oscurece (incidere) para aplicar en las zonas de luz y de sombra, respectivamente. Esta forma de proceder se recoge en otros tratados medievales y el mismo Cennini relata esta práctica en distintos capítulos¹⁶. Con este sistema se consigue una paleta muy rica en matices con un número limitado de pigmentos (Gasol, 2012).

¹⁶ «Después, ya quieras un vestido blanco, rojo, amarillo o verde, o del color que sea, toma tres pocillos. Echa en el primero el color que desees dar al vestido, por ejemplo rojo: mezcla entonces cinabrés y un poco de blanco de san Juan y mézclalos con agua. Los otros dos colores serán tonos más claros: el primero lo harás poniendo más blanco de san Juan, y el segundo será un tono intermedio entre ambos». Cennini, capítulo LXXI, «De cómo pintar un vestido al fresco» (Brunello, 1988: 121).

Teófilo da instrucciones de dónde y cómo aplicar cada tono cuando se construye un vestido o un rostro. Por ejemplo, el primer tono oscurecido de un color es para la representación de los pliegues, y el segundo tono, todavía más oscurecido, es para las líneas del contorno del vestido. Esta forma de proceder puede observarse en distintas zonas cromáticas de Sant Climent de Taüll (figura 15). El relato detallado de instrucciones para pintar rostros y vestidos también aparece en el libro del Arte y en el manuscrito de Montpellier. No obstante, hay pequeñas diferencias entre estos textos. Si bien la secuencia *mitte-incide-matize* o *impleantur/discernatur/illuminetur* es general para todos los manuscritos, en *Schedula Diversarium Artium* es donde aparece de forma más sofisticada: 1) color de base; 2) líneas de perfil con un color un poco más oscuro que el de base; 3) sombras, un poco más claras que el color 2; 4) primeras luces, un poco más claras que el color de base; 5) segundas luces, más claras que 4, y 6) opcionalmente, se aplica una tercera luz. En las figuras de Sant Climent de Taüll las líneas de perfilar están aplicadas sobre los tonos de base. Aparecen uno o dos tonos de sombra. Y efectivamente, como coinciden todos los tratados, las últimas pinceladas corresponden a las luces. Por otro lado, si bien para Cennini es una cuestión práctica el carácter central que tienen estas instrucciones para las figuras, en los textos medievales los rostros y vestidos son considerados, espiritualmente, la parte más importante de la representación pictórica. En este sentido, encontramos escrito en el manuscrito de Montpellier: «In the name of the Father and the Son and the Holy Spirit. Amen. We begin therefore with painting the human being which is worthier than other things and creatures, and what is more, because the head is the supreme part of the whole body, deservedly we shall begin with the head» (Clarke, 2011: 122).

En este contexto, donde se considera la cabeza la parte suprema de todo el cuerpo, no es de extrañar que se quisiese realzar la figura de la *Maiestas Domini* a través del nimbo crucífero, concretamente, dorando la cruz. En la Edad Media el color dorado tenía un fuerte significado simbólico. El oro representaba poder y autoridad. En muchas obras medievales aparecen dorados ciertos elementos para resaltarlos desde un punto de vista jerárquico, iconográfico o estético. Para conseguir el dorado se usaban hojas metálicas de oro, principalmente durante el periodo gótico, pero también hojas de plata o de estaño, sobre todo en el



Figura 15. Detalles de la representación de los vestidos en las pinturas del àbside de Sant Climent de Taüll. Se observa como en todos los colores, se aplica el procedimiento de los tres tonos para construir el objeto: tono base, tono más oscuro y tono más claro.

románico, recubiertas con barnices coloreados creando *falsos dorados*. En los brazos de la cruz del nimbo de la *Maiestas Domini* de Sant Climent de Taüll se han encontrado restos escasos de un material negro, que una vez analizado, ha resultado ser estaño alterado (Oriols, Marqués y Prats, 2014). Probablemente se aplicaron hojas de estaño que fueron corladas, es decir, recubiertas por un barniz que imitaba el color del oro. En el manuscrito de Montpellier aparece una receta para conseguir la *doratura* o *vermeil* basada en mezclar azafrán con aloe y aceite de linaza (Clarke, 2011: 139). En *De Diversis Artibus* se describe un procedimiento un poco distinto. Una vez barnizadas las láminas de estaño con una mezcla de sandálica y aceite de linaza, se recomienda sumergirlas en una preparación caliente que contenga madera, azafrán, vino o cerveza, para que adquieran una tonalidad dorada. Una vez barnizadas de nuevo, podrían adherirse a la obra con cola de piel (Theophilus, 1961: 23).

En cuanto a la aplicación del color, se observa el uso de distintos pinceles que dejan anchos de pinceladas variables. En los fondos de los registros o en los interiores de las aureolas se han usado pinceles planos gruesos, entre 1,5 cm y 3,8 cm. Los pinceles finos, entre 0,2 mm y 1 cm, se han utilizado para perfilar dibujos (caras, cuellos y columnas), para realzar detalles como los ladrillos de las columnas, para perfilados en general o para aplicar las luces y las sombras. Esta forma de utilizar los pinceles coincide con las explicaciones que da Dionysius of Fournia en el capítulo «Instructions for the art of mural painting, that is to say how you depict scenes on a wall, and how you prepare brushes for mural painting»¹⁷. Cabe la posibilidad que los fondos fueran realizados por unos pintores y se dejaran para el maestro las pinceladas de importancia, de gruesos, medios o pequeños, en los detalles. Si hay algo evidente en este conjunto pictórico es que la pincelada del maestro de Sant Climent de Taüll destaca por la seguridad en el trazo.

4. Conclusiones: la excepcionalidad de la obra

Se ha constatado analíticamente que estas pinturas murales están realizadas sobre un mortero fresco de cal y acabadas al seco, y que las líneas de dibujo están pintadas sobre el enlucido con un color *verdaccio*. Los distintos pigmentos se han aplicado, mezclados o no, en capas superpuestas siguiendo el procedimiento de la terna cromática y la cruz del nimbo de la *Maiestas Domini*, posiblemente, era dorada.

Dado que materiales y procedimientos, los colores y la forma de aplicarlos son totalmente coincidentes con las instrucciones generales expuestas en los tratados medievales, la excepcionalidad de esta obra radica sobre todo en el virtuosismo del maestro de Taüll, visible a través de su trazo y pinceladas. Se hace evidente un maestro experto en el arte de la pintura. Probablemente el pintor tenía un largo recorrido y experiencia en la realización de pintura sobre tabla. En los frontales de altar de Ix, de Esquius y de la Seu d'Urgell, por ejemplo, se reconocen pautas del proceso creativo muy similares a las observadas en las pinturas murales de Sant Climent de Taüll.

La base geométrica que rige la composición de estas pinturas es el pentágono y, por tanto, la proporción áurea está presente. Sabemos hoy día que la utilización de la sección áurea es un criterio profesional para realizar buenos diseños y que, cuando la naturaleza crea

¹⁷ «Know that brushes for mural painting should be from the mane of an ass, the fetlocks of an ox, the hair of a mannygoat (they are equally good) or from the beard of a mule. Make them thus: fix as many hairs as is necessary in the quill of an eagle, and they will serve for painting flesh, overlapping layers of paint and anything else you wish to do. Make brushes that you use for broad underpainting from hog's hair, first waxing the ends in sintzimi and then tying them to a piece of wood without using a quill. This is how brushes for wall-painting are made» (Hetherington, 1990: 12).

formas geométricas, éstas también la contienen. Por lo tanto, la composición pictórica de Sant Climent de Taüll, del siglo XII, sigue unos cánones estéticos totalmente aceptados y valorados por el espectador contemporáneo y, ciertamente, atemporales.

Bibliografía

- BERUTO, D. T.; BARBERIS, F., y BOTTER, R. (2005): «Calcium carbonate binding mechanisms in the setting of calcium and calcium-magnesium putty-limes». *Journal of Cultural Heritage*, 6: 253-260.
- BOULEAU, C. (1963): *The Painter's Secret Geometry: A Study of Composition*. Nueva York: Dover Editions.
- BRUNELLO, F. (1988): *Cenninno Cennini «El libro del Arte»* (traducción de Fernando Olmeda Latorre). Madrid: Ediciones Akal.
- CABEZA, L. y ORTEGA, L. (1999): *Anàlisi gràfica i representació geomètrica*. Barcelona: Edicions de la Universitat de Barcelona.
- CAVALLINI, G.; CAVALLINI, P., y ZANNARDI, B. (2002): *La questione di Assisi e il cantiere mediavale della pittura a fresco*. Milán: Biblioteca d'Arte Skira.
- CLARK, R. J. H.; HARK, R. R.; SALVADÓ, N.; BUTÍ, S., y PRADELL, T. (2010): «Spectroscopy study of mural paintings from the Pyrenean Church of Saint Eulàlia of Unha». *J. Raman Spectrosc.*, 41: 1418-1424.
- CLARKE, M. (2011): *Medieval Painters's Materials and Techniques. The Montpellier Liber diversarum arcium*. Londres: Archetype Publications.
- ELERT, K.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; SEBASTIÁN PARDO, E.; HANSEN, E., y CAZALLA, O. (2002): «Lime Mortars for the Conservation of Historic Buildings». *Studies in Conservation*, vol. 47, n.º 1: 62-75.
- GASOL, R. M. (2012): *La tècnica de la pintura mural a Catalunya i les fonts artístiques medievals*. Barcelona: Publicacions de l'Abadia de Montserrat.
- GUÀRDIA, M. (2016): «Difusión de modelos y repertorios en la pintura mural hispánica: los Pirineos y las tierras castellanas». En *Modelo, copia y evocación en el Románico Hispánico*. Aguilar del Campo: Fundación santa Maria la Real del Patrimonio Histórico, 145-169.
- HETHERINGTON, P. (1974): *The painter's manual of Dionysius of Fourna* (An English translation, with Commentary, of cod. gr. 708, in the Saltykov-Schedrin State Public Library, Leningrad). Nueva York: Oakwood Press.
- MARQUÈS, M. (2016): *Sant Climent de Taüll. La restauració de les pintures murals i les aportacions a l'estudi del monument*. Tesis doctoral defendida en la Universidad de Barcelona. Pendiente de publicación.
- MARQUÈS, P., y ORIOLS, N. (2014): «Estudi dels materials i restauració de les pintures murals de Sant Romà de les Bons». Catàlego exposición Benvinguts a casa vostra, 117-132.
- MORA, P., y L.I. PHILIPPOT, P. (1999): *La conservación de las pinturas murales*. Editrice Compositori.
- MORER, A., y FONT-ALTABA, M. (1993): «Materials pictòrics medievals. Investigació de les pintures murals romàniques a Catalunya». *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, 1: 71-116.
- NIMMO, M., y OLIVETTI, C. (1987): «Sulle technique di trasposizione dell'immagine in epoca medievale». *Revista dell'istituto d'archeologia e storia dell'arte*, III serie VIII-IX, 399-411.
- ORIOLS, N.; MARQUÈS, P., y PRATS, E. (2014): «Tin foils from Sant Climent de Taüll's and Sorpe's mural painting. Why a micro sample?». Book of Abstracts Madrid: 11 International Conference on non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of cultural and environmental heritage Art'14 p. Ind.18.

- ORIOLS, N.; OSMOND, J., y MARQUÈS, P. (2015): «SEM-EDX analysis of transferred wall painting to determine original painting technique». Book of Abstracts TECHNART, p. 81.
- PAGÈS, M. (2009): «La problemàtica dels models en la pintura romànica catalana: la Crucifixió de Sorpe i la d'Estaon». *Butlletí del Museu Nacional d'Art de Catalunya*, vol. 10. Barcelona: Museu Nacional d'Art de Catalunya, 35-55.
- PALET, A., y DE ANDRÉS, J. (1999): «The Identification of Aerinite as a Blue Pigment in the Romanesque Frescoes of the Pyrenean Region». *Studies in Conservation*, vol. 37, n.º 2: 132-136.
- PIOVESAN, R.; MAZZOLI, C.; Maritan, L., y CORNALE, P. (2012): «Fresco and lime-paint: an experimental study and objective criteria for distinguishing between these painting techniques». *Archaeometry*, 54, 4: 723-736.
- PIQUÉ, F., y VERRI, G. (2015): *Organic Materials in Wall Paintings*. Los Ángeles: The Getty Conservation Institute.
- ROLLIER-HANSELMANN, J. (2014): *Peintures Romanes. Bourgogne-Rhône-Alpes- Suisse Romande*. Mâcon: Académie de Mâcon.
- SALVADO, N.; BUTI, S.; PANTOS, E.; BAHRAMI, F.; LABRADOR, A., y PRADELL, T. (2008): «The use of combined synchrotron radiation micro FT-IR and XRD for the characterization of romanesque wall paintings». *Applied Physics A-Materials Science and Processing*, 90: 67-73.
- SEGARRÉS, M. (2011): «La pintura mural en el de Diversis Artivus de Teòfil». *URTX: Revista cultural de l'Urgell*, n.º 25: 146-151.
- SENDER, E. (1981): *L'icône, image de l'invisible: éléments de théologie, esthétique et technique*. París: Desclée De Brouwer.
- THEOPHILUS (1979): *On divers arts: the foremost medieval treatise on painting, glassmaking and metalwork* [translated from the Latin with intr. and notes by John G. Hawthorne and Cyril Stanley Smith]. Nueva York: Dover.
- THEOPHILUS (1961): *De diversis artibus* [translated from the Latin with introduction. and notes by C.R. Dodwell]. Londres, Edinburgo, París, Melbourne, Toronto y Nueva York: Thomas Nelson and Sons Ltd.
- WINFIELD, D. C. (1968): «Middle and Later Byzantine Wall Painting Methods. A Comparative Study». *Dumbarton Oaks Papers*, vol. 22: 61-139.
- WITTKOWER, R. (1979): *Sistemas de proporciones*. Barcelona: Gustavo Gili.

Estudio y análisis de los procesos de alteración por agentes microbiológicos en obras pictóricas sobre lienzo expuestas en claustros de conventos y monasterios del centro histórico de Quito, Ecuador

Fernando Poyatos Jiménez

Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de Ecuador
UTE Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito. Ecuador
fpoyatos1@us.es
fernando.poyatos@ute.edu.ec

Rosa Morales Cabrera, Lourdes Cevallos Paredes y Carla Freile

UTE Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito. Ecuador

Fátima Morales

Sbarro Institute for Cancer Research and Molecular Medicine
Temple University. Filadelfia. Pensilvania. EE. UU.

Resumen: El centro histórico de la ciudad de Quito (Ecuador) fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad en el año 1978. En lugares de culto como los claustros de los conventos y monasterios se encuentran expuestas obras pictóricas en ambientes donde la acción microbiológica puede desarrollar episodios de alteración en los materiales artísticos. Las obras analizadas en este trabajo de investigación pertenecen a los conjuntos monumentales de los conventos de San Francisco, Santo Domingo y Santa Clara. Para su estudio, se han analizado los agentes microbiológicos presentes mediante técnicas tradicionales de identificación microbiológica. Estos microorganismos permitieron la realización de estudios experimentales con materiales artísticos de referencia en donde fueron inoculados. Con los resultados obtenidos podremos seguir recabando interesantes datos en nuestras investigaciones encaminadas a establecer protocolos para el control del comportamiento de los materiales artísticos ante la acción microbiológica y el establecimiento de propuestas de conservación preventiva para su posterior aplicación al patrimonio quiteño.

Palabras clave: Quito, claustros, microbiología, pintura, conservación preventiva.

Abstract: The historic center of Quito, Ecuador, was declared a UNESCO World Heritage site in 1978. In worship places, such as cloisters of convents and monasteries, you can find artwork that is exposed in environments where the microbiological action could develop alteration processes in the artistic materials. The pieces of art of the study belong to the Convents and

Monasteries of San Francisco, Santo Domingo and Santa Clara. For this research, we achieved an environmental monitoring and we studied the microbiological agents that appear in the artwork by traditional techniques of microbial identification. In order to analyze the preventive conservation treatments, we carried out experimental studies with artistic materials of reference. These results could improve the setup of protocols for the control of materials against the microbiological action, as well as the arrangement of preventive conservation proposals, in order to be employed in the cultural heritage of Quito.

Keywords: Quito, cloisters, microbiology, painting, preventive conservation.

Introducción

El centro histórico de Quito recibió su máxima distinción en el año 1978 cuando fue declarado Patrimonio Cultural de la Humanidad considerándose hoy como el centro histórico más grande de Sudamérica. El patrimonio mueble que alberga y que se resguarda en el interior de monasterios, conventos, iglesias y museos es muy extenso y gran parte de él se expone actualmente en los claustros. En estos espacios se ubican importantísimos conjuntos pictóricos junto a otras obras como retablos, alfarjes, pinturas murales, sepulcros, etc., como ocurre en los conventos de San Francisco (figura 1), Santo Domingo (figura 2) y Santa Clara.



Figura 1. Claustro principal del convento Máximo de San Francisco de Quito. Fotografía: Fernando Poyatos.



Figura 2. Claustro del convento de Santo Domingo (ala este). Fotografía: Fernando Poyatos.

La estructura y ubicación espacial de estos claustros en el interior de los conjuntos monumentales es diversa en su tamaño, altura, orientación, etc. En algunos de ellos encontramos también interesantes y pintorescos conjuntos ajardinados que aportan un elemento exótico al carácter místico y religioso de las edificaciones.

Todos estos aspectos, junto a unas condiciones ambientales específicas, requieren del establecimiento de actuaciones concretas en materia de conservación preventiva. También la falta de asesoramiento o de formación del personal encargado del mantenimiento puede desembocar en actuaciones de conservación inapropiadas y actuaciones parciales en este sentido. Algunas de las obras más expuestas a las inclemencias medioambientales y a la falta de mantenimiento y control son las pinturas sobre lienzo. Por ello, y como primer paso del estudio llevado a cabo en nuestro proyecto, exponemos los resultados obtenidos en cinco obras pertenecientes a las tres instituciones religiosas antes citadas y que se ubican en el lado sur del centro histórico de Quito.

Para comenzar a abordar el estudio del biodeterioro en pintura sobre lienzo es necesario contextualizar cuáles son las características que definen este tipo de alteraciones. Durante los últimos años el estudio y análisis del biodeterioro en obras de arte ha experimentado una enorme evolución, ya que se requerían nuevos estudios científicos para intensificar el conocimiento en este campo específico de la conservación y restauración. Durante este tiempo se han realizado importantes aportes desde distintos grupos de investigación repartidos en diferentes ámbitos científicos y culturales a nivel mundial y se han desarrollado nuevas técnicas y protocolos para su estudio (Caneva, Nugari y Salvadori, 2005: 500; Sterflinger, 2010: 47-55; Piñar *et al.*, 2015: 849-859). La obra pictórica realizada sobre lienzo presenta una gran complejidad dada su constitución mixta de materiales orgánicos e inorgánicos dispuestos en delgadas capas de muy diverso carácter y función. Hasta hace pocos años la descripción de las alteraciones producidas por la acción de los microorganismos se mostraba mayoritariamente de forma macroscópica, describiendo los procesos de deterioro que tenían lugar en la estructura interna de las obras en donde los soportes textiles actuaban como material orgánico principal que suponía el mayor aporte de nutrientes para que, en unas condiciones medioambientales

concretas, tuvieran lugar episodios de crecimiento y alteración microbiológica de hongos y bacterias (Caneva, Nugari y Salvadori, 2000: 277). Se analizaba la acción enzimática y las sustancias de excreción generadas por estos microorganismos en estudios aportados por equipos de investigación surgidos de ámbitos como la química orgánica, la farmacia, la tecnología de los alimentos, las ciencias ambientales, etc. A todos ellos se sumaron estudios que comenzaron a aplicar decisivas técnicas analíticas surgidas de la biotecnología en donde ya se ha hecho indispensable describir, mediante el empleo de técnicas moleculares, la especie concreta que interviene en los procesos de alteración, así como otros aspectos específicos necesarios para entender y justificar los procesos de biodeterioro (Sterflinger, 2010: 47-55). En este sentido se ha avanzado muchísimo en la descripción y diagnóstico de este tipo de alteraciones.

En cuanto a las técnicas microscópicas, quizá el empleo de la microscopía electrónica de alta resolución ha logrado por fin describir visualmente lo que ocurre en el interior de los estratos pictóricos y se han podido desarrollar gracias a ello nuevos modelos gráficos (Poyatos, 2007: 175) que han apoyado las tesis establecidas anteriormente en la literatura (figura 3).

Para ello, una de las metodologías que más ha aportado a estos avances han sido los estudios experimentales realizados en laboratorio mediante el empleo de probetas preparadas con distintos materiales y soportes pictóricos, en donde –una vez inoculados los microorganismos y sometidos a unas condiciones medioambientales específicas– lográbamos realizar un seguimiento de su evolución y de las alteraciones que tenían lugar (Inoue y Koyano, 1991: 23-55; Seves, Sora y Ciferri, 1996: 215-224; Poyatos, 2007: 175; Romero *et al.*, 2010: 1-8; Paner, 2012: 114-120; López *et al.*, 2013; Mandana y Nuruladidabt, 2014: 47-54; Pavic, 2015: 40-50). El análisis de la constitución de los materiales artísticos de referencia antes y después de estos estudios nos permitían conocer qué procesos se suceden como consecuencia de la acción

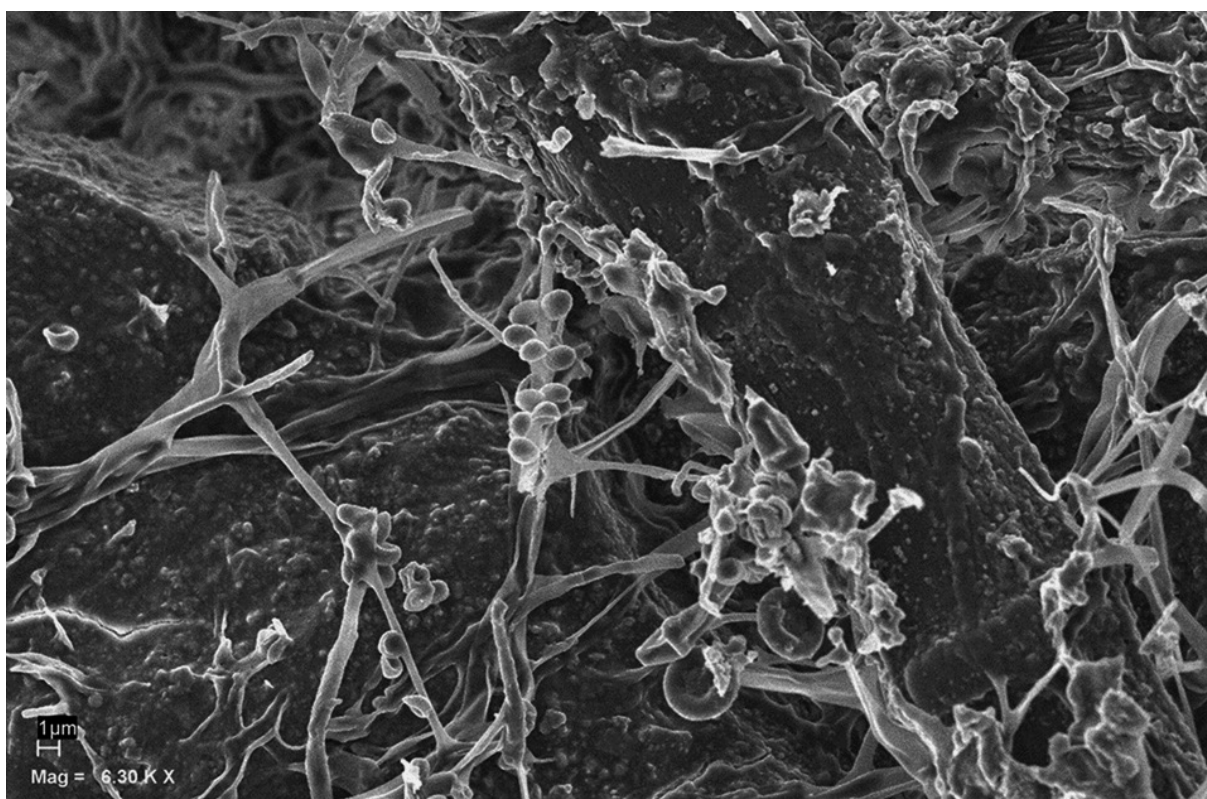


Figura 3. Fotografía FESEM. Alicia González-Fernando Poyatos. CIC-UGR.

microbiana y compararlos con aquellos procesos de alteración que se producían por la propia desnaturalización de los componentes de los materiales. Se analizaban bien en conjunto o por separado las alteraciones del soporte y sustancias filmógenas como principales materiales orgánicos y las consecuencias físico-químicas en las sustancias de carga y pigmentos minerales.

Sin embargo, gran cantidad de los trabajos realizados se han encaminado al estudio y análisis del diagnóstico y menos a la elaboración de propuestas reales de conservación. Este aspecto se debe además a la dificultad que supone la metodología de aplicación de tratamientos efectivos. El análisis del biodeterioro producido por microorganismos en pintura sobre lienzo entraña una dificultad extraordinaria que el estudio de otras disciplinas puede abordar asumiendo menores riesgos. Este aspecto –además de no facilitar el empleo de técnicas analíticas– es un factor determinante para realizar tratamientos que garanticen, por un lado, la eliminación del microorganismo que interfiere, y por otro, lograr respetar todos y cada uno de los materiales artísticos sin que se afecte a la composición química y a la imagen estética que finalmente esta configura.

Material y métodos

Obras pictóricas

Las obras estudiadas pertenecen a la creación pictórica quiteña de los siglos XVII y XVIII. De ellas se tomaron previamente muestras que permitieron la identificación de distintos géneros de microorganismos. Del monasterio de San Francisco se analizaron las obras *Aparición de la Virgen en la Porciúncula* y *La entrada de Jesús en Jerusalem*, ambas del siglo XVIII, expuestas en el claustro principal. Del convento de Santo Domingo las obras estudiadas fueron *Santa Teresa de Ávila* y *San Francisco de Asís* de los siglos XVII y XVIII, que actualmente se encuentran en el claustro mayor y, finalmente, del convento de Santa Clara la obra *La Divina Pastora*, del siglo XVIII, expuesta en los muros de las escaleras del claustro mayor (figura 4).



Figura 4. *La Divina Pastora*. Autor: anónimo. Convento de Santa Clara. Óleo sobre lienzo. 191 x 290 cm. Siglo XVIII. Fotografía: Fernando Poyatos.

Microorganismos

Después de una primera fase de toma de muestra microbiológica se identificaron diversos géneros de hongos y bacterias obtenidos mediante cultivo en placas Petri. Para este primer estudio experimental de hongos se emplearon los siguientes microorganismos: *Alternaria*, *Rhizopus*, *Aspergillus*, *Ulocladium*, *Penicillium*, *Fusarium*, *Mucor*, *Cladosporium* y *Paecilomyces*.

Para la obtención de cultivos frescos se realizaron suspensiones en solución salina estéril, y se inocularon en medios de cultivo adecuados, líquidos y sólidos, incubándolos a 25 °C y 85 % de humedad relativa hasta la aparición de crecimiento. Los resultados fueron extensos, por lo cual se realizó una selección de las colonias fúngicas predominantes y las que se encontraron en más de una de las obras.

Obtención de suspensiones fúngicas

Se obtuvieron a partir de cultivos sólidos en «pico de flauta» de 48-72 horas añadiendo 2 ml de solución de Tween 20. Tras agitación, la suspensión obtenida se centrifugó y el *pellet* se lavó tres veces con agua destilada estéril para eliminar los restos de medio de cultivo. Finalmente se suspendieron en agua destilada estéril.

Preparación de soportes pictóricos textiles con materiales artísticos de referencia

Mediante técnicas estratigráficas y cromatográficas realizadas previamente pudimos identificar los materiales artísticos que componen las obras analizadas. Estos resultados, junto a la investigación histórico-artística de las técnicas pictóricas utilizadas en Quito entre los siglos XVII-XVIII, proporcionaron la información necesaria para la preparación de los soportes, así como aglutinantes, materiales filmógenos y sustancias de carga empleadas en la preparación de probetas en donde se inocularon los distintos microorganismos.

Soporte textil

Se prepararon con pequeñas probetas de 3 × 3 cm de tela de fibra de lino con un sisado de cola animal al 12 %, utilizado en obras pictóricas. Su composición en celulosa es de un 76 %-88 %, altamente cristalina (orientación molecular paralela al eje de la fibra), 19 % de hemicelulosa, 6 % de pectina y 3 % de cera.

Base de preparación

Empleada para recibir la capa pictórica, consta de una carga inerte y un aglutinante con propiedades secantes y adhesivas. Este estrato se preparó por duplicado con la finalidad de atender a las distintas composiciones analizadas en los materiales originales de las obras y que respondían a las técnicas empleadas en la pintura quiteña de los siglos XVI-XVIII y que empleaban una preparación acuosa a base de cola animal y otra preparación aceitosa que se prepara con aceite de linaza.

Base de preparación magra:

- Carbonato de calcio + Cola de conejo: adhesivo animal fabricado mediante la cocción de residuos de piel y cartílagos; por lo tanto, en su composición hay principalmente sustancias proteicas.

Base de preparación grasa:

- Carbonato de calcio + Aceite de linaza + Óxidos de hierro (ayuda a secar la preparación más rápidamente y agrega coloración tierra a la preparación).

Con la finalidad de poder visualizar el crecimiento de microorganismos de manera selectiva, en este estudio experimental descartamos la inclusión de capas pictóricas compuestas por pigmentos y aglutinantes de manera que el crecimiento pudiera ser visible directamente desde la capa de preparación hasta la capa de protección.

Las sustancias filmógenas empleadas como capa de protección fueron:

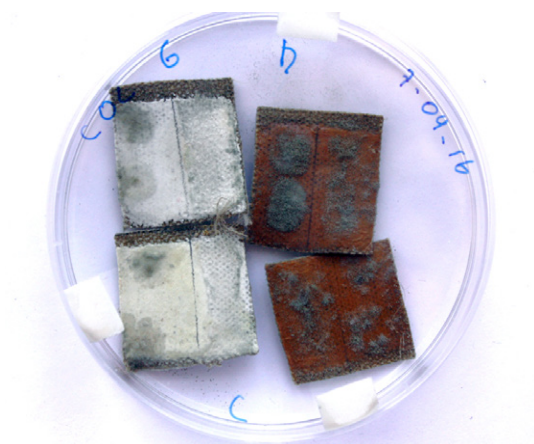
- **Barniz Dammar.** Resina de origen vegetal del exudado de árboles de zonas como Indonesia y Filipinas de la familia *Dipterocarpaceae*. Compuesta por triterpenos, es clara, elástica y forma un film muy brillante. Es una de las resinas más utilizadas en el arte a pesar de que pierde sus características y su tonalidad se hace amarillenta con la luz y el tiempo. Se disuelve en solventes aromáticos, *white spirit* o esencia de trementina.
- **Barniz Copal.** Resina natural compuesta por diterpenos, obtenida de plantas naturales como los poríferos. Son resinas muy duras y tienen una temperatura de fusión elevada, la cual se tuvo que superar para poderla disolver en esencia de trementina.

Inoculación de las probetas

Fueron preparadas 64 probetas: 32 con base de preparación grasa y 32 con base de preparación magra; 16 de cada grupo fueron barnizadas hasta la mitad con barniz Dammar, y las otras 16 con Copal. En la mitad izquierda de cada probeta se inocularon 100 ml de las correspondientes suspensiones de los microorganismos seleccionados sobre la capa de barniz aplicada y la mitad derecha se utilizó también inoculada como control del crecimiento sin barniz.

Las muestras se ordenaron de la siguiente manera:

- Dos probetas de base de preparación aceitosa y dos probetas de base de preparación acuosa, uno para cada tipo de sustancia filmógena (barniz). Posteriormente fueron introducidos en placas Petri y se incubaron en una cámara húmeda a 25 °C y al 85 % de humedad, en ausencia total de luz.



Observación y documentación

El seguimiento y documentación fotográfica de la evolución de las placas se realizó mediante cámara digital Canon. Se realizaron tres tomas de una, tres y cinco semanas (figura 5).

Figura 5. Placa con probetas inoculadas con cinco semanas de incubación. Se muestra la evolución de los soportes. Fotografía: Carla Freile-Fernando Poyatos.

Resultados

Alteraciones físicas

La alteración de los soportes se manifestó, en primer lugar, por el cambio de coloración del barniz provocado por una oxidación del mismo volviéndose en un tono amarillento. Los cambios se manifiestan tanto en los controles como en los soportes inoculados con los microorganismos.

Alteraciones debidas a los microorganismos

En la tabla 1 se muestra la evolución del crecimiento de los microorganismos sobre los soportes. El crecimiento se evaluó según un índice numérico del 1 al 5 siendo el 1 = 1-10 %, el 2 = 10-25 %, el 3 = 25-50 %, el 4 = 50-75 % y el 5 = 75-100 % de cobertura.

Tabla 1 Crecimiento de hongos sobre los soportes de tela con dos tipos de base de preparación y dos tipos de barniz tradicionales						
Tabla 2 Hongos	Copal		Dammar		Sin barniz	
	Base preparación aceite	Base preparación cola	Base preparación aceite	Base preparación cola	Base preparación aceite	Base preparación cola
COL-1 <i>Alternaria</i>	1	1	1	2	0	3
COL-2 <i>Alternaria</i> (Especie <i>Alternata</i>)	1	5	0	4	3	0
COL-3 <i>Rhizopus</i>	1	2	1	3	0	3
COL-4 <i>Aspergillus</i>	1	3	0	3	1	0
COL-5 SF3 <i>Alternaria</i>	0	1	0	2	0	0
COL-5 SD2 <i>Ulocladium</i>	2	0	0	1	0	0
COL-6 <i>Penicillium</i>	1	4	0	1	1	0
COL-7 <i>Penicillium</i> (Especie <i>carneum</i>)	1	5	0	4	0	2
COL-8 <i>Penicillium</i> (Especie <i>citrinum</i>)	2	3	1	4	0	0
COL-9 <i>Fusarium</i>	0	3	0	2	0	3
COL-10 <i>Mucor</i>	0	4	0	2	0	1
COL-11 <i>Cladosporium</i>	1	4	3	3	0	0
COL-12 <i>Paecilomyces</i>	0	3	2	2	1	5
COL-13 <i>Fusarium</i> (Especie <i>Oxysporum</i>)	1	0	0	3	0	2
COL-14 <i>Aspergillus</i> (Especie <i>versicolor</i>)	1	1	1	2	3	1
COL-15 <i>Aspergillus</i> (Especie <i>Aspergillus niger</i>)	2	5	0	2	0	1

Durante el periodo de incubación comenzó la aparición de colonias de microorganismos así como microfisuras y microdescamaciones dependiendo del tipo de material y del microorganismo inoculado.

Discusión

La estabilidad de cualquier obra de arte depende de dos elementos fundamentales: del material del cual está construida, y de las condiciones a las que ha estado sometida a lo largo del tiempo. Estos aspectos son determinantes en las alteraciones producidas por el biodeterioro, ya que los microorganismos actúan de una forma extraordinariamente selectiva.

Teniendo en cuenta su composición, los materiales se pueden dividir en dos grandes grupos: materiales orgánicos y materiales inorgánicos, siendo los primeros, en general, mucho más susceptibles a la acción de los agentes degradantes. La humedad y la temperatura son los principales parámetros a tener en cuenta en estos procesos degradativos. Ambos factores favorecen la desintegración física, química y biológica, ya que de un lado aceleran el desarrollo del proceso de degradación, y de otro, son determinantes para el crecimiento de los microorganismos.

La humedad incide en los procesos de deterioro relacionados con las alteraciones dimensionales, que pueden dar como resultado el torcimiento de las fibras textiles y la aparición de grietas en las reacciones de deterioro químico y en el biodeterioro. Por otro lado, la temperatura es importante por el papel que desempeña en las velocidades de las reacciones del deterioro químico y por los cambios mecánicos que produce en las estructuras de los materiales.

La temperatura ideal para el crecimiento de hongos se sitúa entre los 15 °C y los 25 °C y para las bacterias entre los 20 °C y 30 °C. El rango de humedad en que pueden desarrollarse estos microorganismos oscila entre el 85 %-90 % (Seves, Sora y Ciferri, 1996: 215-224).

Giacobini *et al.* (Giacobani, Pedica y Spinucci, 1991: 93-112) resumieron el proceso de alteración del estrato pictórico y del soporte textil de una pintura sobre tela en varias fases (tabla 2).

En este estudio hemos podido confirmar la influencia determinante que ejercen en los procesos de biodeterioro estos factores ambientales, así como las características estructurales tales como el tipo de soporte y otros materiales orgánicos constituyentes de la obra de arte,

Tabla 2
Fases del biodeterioro en pintura sobre lienzo. Giacobini *et al.*, 1991

Fases del proceso de alteración	Estrato pictórico	Soporte textil
Fase inicial	Vetas blancas, colonias fúngicas aisladas.	Micelio en forma de veladuras. Micelio inicial formando manchas y estratos continuos.
Fase aguda	Velos micélicos más o menos expandidos	Micelio aterciopelado con espesor variable entre 2 mm y 50 mm.
Fase final	Manchas de varios colores y dimensiones. Levantamiento del color.	Ausencia de micelio evidente, manchas más o menos pulverulentas y tela desgastada.

como los aglutinantes y las sustancias filmógenas. Los hongos que presentaron crecimiento evidente fueron del género *Alternaria*, *Aspergillus* y *Penicillium*, principalmente, y en menor medida *Mucor*, *Cladosporium* y *Rhizopus*, todos ellos conocidos como importantes agentes de biodeterioro.

Por lo tanto, y tal como describieron Caneva *et al.* (Caneva, Nugari y Salvadori, 2000: 277), los procesos de biodeterioro de los materiales se producen a través de mecanismos de distintos tipos: procesos físicos o mecánicos (fractura y disgregación) y procesos químicos (hidrólisis y descomposición). Generalmente estos procesos de alteración tienen lugar de forma simultánea, pero dependiendo de los agentes biodeteriorantes, el tipo de sustrato y las condiciones ambientales pueden predominar los primeros o los segundos.

En este estudio experimental también los procesos degradativos producidos por los microorganismos estuvieron precedidos de procesos iniciales de alteración de los materiales. En el caso del barniz se produjo un rápido amarilleamiento fruto de un proceso acelerado de degradación producido por su exposición a un alto nivel de humedad relativa junto a la ausencia de luz de una forma prolongada durante las cinco semanas que permanecieron las probetas en las estufas. De igual manera, y al producirse la hidrólisis de las fibras de lino en los soportes y por el tamaño de las probetas, se observó una torsión de los bordes de la tela fruto de los movimientos de dilatación de las fibras textiles.

Según Calvo (2002), las alteraciones de tipo biológico se pueden manifestar en los soportes de tela de diferentes formas, como manchas blanquecinas o de distintos colores (pardos, grises o negros) llegando incluso a visualizarse micelios de hongos. Estos microorganismos pueden provocar la hidrólisis de la celulosa y la pérdida de resistencia mecánica.

Caneva *et al.* (Caneva, Nugari y Salvadori, 2005: 500) también describieron más tarde que la degradación del soporte es más fuerte y probable cuando está impregnado de otras sustancias (azúcar, almidón, colas, suciedad) propensas a la degradación iniciando un proceso de daños mecánicos en la obra. En este proceso los hongos se fijan directamente con las hifas, a modo de raíces, iniciando la formación de un micelio hasta convertirse en manchas más grandes y desarrolladas.

En cuanto a estos materiales orgánicos, Nicolaus (Nicolaus, 1999: 425) expuso que las sustancias nutritivas más importantes para los microorganismos causantes de biodeterioro son los aglutinantes. Dependiendo de la técnica pictórica empleada, los primeros en ser deteriorados son la cola de glutina y el temple de caseína, seguidos del temple de huevo, el temple de emulsión, el aceite y finalmente la resina Dammar, la almáciga, la colofonia y las resinas sintéticas si fuera el caso de obras pictóricas contemporáneas. Esto origina pulverulencia, decoloración y desprendimiento de las capas pictóricas.

En este sentido se observó el oscurecimiento inicial de algunos inóculos junto con procesos de agrietamiento de las capas de preparación, y de manera más acusada en aquellas que empleaban cola animal como sustancia aglutinante rica en proteínas, en donde destaca la actividad producida por el género *Alternaria*. Este tipo de alteraciones precedieron a las producidas en preparaciones que contenían aceite de linaza.

Finalmente, y en relación con la capa de protección, el crecimiento de las hifas se produjo antes en las zonas de las probetas que no contenían capa de barniz, ya que en las zonas donde este se encontraba actuó como barrera de contención del crecimiento ramificado que finalmente también terminó por producirse, causando el agrietamiento general y la aparición de fuertes coloraciones en la superficie de las probetas.

Conclusiones

Con este estudio experimental hemos podido comparar los resultados obtenidos con aquellos descritos anteriormente en la bibliografía, analizando los procesos de biodeterioro que se producen en los distintos materiales orgánicos e inorgánicos constituyentes de una pintura sobre lienzo, atendiendo especialmente a aquellos materiales empleados en capas de preparación y de protección utilizados en la pintura quiteña de los siglos XVII y XVIII.

Este protocolo de análisis se ha mostrado muy efectivo para el control y observación de los procesos de deterioro, siendo un método muy eficaz para realizar controles periódicos de las distintas colecciones pictóricas que se pretendan estudiar en el futuro o que estén bajo procesos y protocolos de conservación preventiva.

Los estudios propuestos se muestran como un complemento de otros análisis que se deben realizar paralelamente, tales como los métodos de identificación de especies con técnicas moleculares y posteriores estudios experimentales que empleen tratamientos biocidas que ayuden a establecer nuevas propuestas de conservación y restauración de manera más efectiva.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación se ha realizado gracias a la financiación del Programa Prometeo de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia y Tecnología del Gobierno de Ecuador.

Bibliografía

- CALVO, A. (2002): *Conservación y restauración de pintura sobre lienzo*. Barcelona: Del Serbal, pp. 152-155.
- CANEVA, G.; NUGARI, M. P., y SALVADORI, O. (2000): *La biología en la restauración*. Hondarribia (Guipúzcoa): Nerea, p. 277.
- (2005): *La biología vegetal per i beni culturali II*. Limena: Nardini editori, p. 500.
- GIACOBINI, C.; PEDICA, M. y SPINUCCI, M. (1991): «Problems and Future Projects on the Study of Biodeterioration: Mural and Canvas Paintings». En: *National Research Laboratory for Conservation of Cultural Property*, editor. Lucknow: International conference on biodeterioration of cultural property, pp. 93-112.
- INOUE, M., KOYANO, M. (1991): «Fungal contamination of oil paintings in Japan», *International Biodeterioration*, n.º 28, pp. 23-55.
- LÓPEZ, M. M.; MARTÍN, I.; YEBRA, Á.; ROMERO, J.; BOLÍVAR, F. C.; ETTEAUER, J.; STERFLINGER, K. y PIÑAR, G. (2013): «Contribution of the microbial communities detected on an oil painting on canvas to its biodeterioration». *Plos One*, 8: e80198.
- MANDANA, B., y NURULADIDABT, A. H. (2014): «Scientific analysis in traditional preventive measure using garlic and vinegar as a wood fungicide in Malaysia». En N. SUKRITI (ed), *International Council for Biodeterioration of Cultural Property, Lucknow*, pp. 47-54.
- NICOLAUS, K. (1999): *Manual de restauración de cuadros*. Berlín: Köneman, p. 425.
- PANER, C. M. (2012): «Chemical control of fungi infesting easel oil paintings at the University of Santo Tomás, Museum of Arts and Sciences». *Prime Journal of Microbiology Research*, 2: 114-120.

- PAVIC, A.; ILIC, T.; PACEVSKI, A.; NEDELJKOVIC, T.; VASILJEVIC, B., y MORIC I. (2015): «Diversity and biodegradative potential of bacterial isolates from deteriorated modern combined-technique canvas painting». *Int Biodeterior Biodegradation*, 97: 40-50.
- PIÑAR, G.; TAHER, H.; STERFLINGER, K., y PINZARI, F. (2015): «Amid the possible causes of a very famous foxing: molecular and microscopic insight into Leonardo da Vinci's self-portrait». *Environ Microbiol Rep*, 7: 849-859.
- POYATOS, F. (2007): *Procesos de biodeterioro en pinturas sobre lienzo del Museo de Bellas Artes de Granada: examen visual y gráfico*. Granada: UGR, p. 175.
- ROMERO, J.; MARTÍN, I.; LÓPEZ, M.; RAMOS, J., y BOLÍVAR, F. C. (2010): «Biodeterioration patterns found in dammar resin used as art material». *Electron J Biotechnol*, 13 (3): 1-8.
- SEVES, A.; SORA, S., y CIFERRI, O. (1996): «The microbial colonization of oil paintings. A Laboratory Investigation». *Int Biodeterior Biodegradation*, 37: 215-224.
- STERFLINGER, K. (2010): «Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage». *Fungal Biology Reviews*, 24: 47-55.

Consolidación y adhesión de pintura vinílica: estudio de la viabilidad y comportamiento frente al envejecimiento de diversos polímeros

Dra. M.^a Teresa Pastor Valls

Conservador restaurador colaborador
 Museu d'Art Contemporani Vicente Aguilera Cerni de Vilafamés
 maytepastorv@gmail.com

Dr. David Juanes Barber

Laboratorio científico IVC+R CulturArts Generalitat
 djuanes@ivcr.es

Resumen: El propósito de esta investigación se centra en el estudio de la estabilidad frente al envejecimiento de varios polímeros (Aquazol® 200, Gelvatol®, funori, Plectol® B500, Acril® 33 y Aquazol® 500) y su posible viabilidad en la consolidación y adhesión de pintura vinílica. Debido a la limitada reversibilidad de este tipo de tratamientos y a los riesgos de producir cambios de tipo físico, químico y mecánico, debemos seleccionar los sistemas más seguros y estables.

En este sentido, se ha llevado a cabo el estudio de los cambios ópticos incluyendo la evaluación del grado de adhesión y cohesión antes y después de envejecer. Para ello, se adaptó la normativa industrial de la industria de recubrimientos pictóricos al ámbito de la conservación y restauración de bienes culturales mediante diferentes test de resistencia. Se detectó la posibilidad de afectación del estrato pictórico por el polímero o la obtención de niveles adhesivos superiores o inferiores que pueden variar al envejecer.

Palabras clave: Test consolidación y adhesión, pintura vinílica, polímeros, envejecimiento.

Abstract: The purpose of this research is to delve into the study of the aging behaviour of various polymers (Aquazol® 200, Gelvatol®, funori, Plectol® B500, Acril® 33 y Aquazol® 500) and their potential viability in the treatment of vinyl paint. Due to limited reversibility of this type of treatments, and the risks of producing physical, chemical and mechanical changes, affecting works in their concept and matter dimension, we must select safer systems and more stable materials.

In this sense, a study of optical changes has been performed including the assessment of the degree of adhesion and cohesion obtained before and after aging. Industrial paint coatings and adhesives standards were adapted to the conservation and restoration of cultural heritage field, performing different tensile and peeling tests. The possibility of paint layer damage by the polymer and the obtention of higher or lower bond levels which may vary with age were detected.

Keywords: Consolidation and adhesión test, vynil paint, polymers, ageing.

1. Introducción

La pintura vinílica comenzó a emplearse de forma extensiva a partir de su fabricación en emulsión acuosa en los años cincuenta, aunque su uso en la formulación de pinturas para Bellas Artes fue limitado al ser superadas por las prestaciones y calidad de las acrílicas (Crook y Learner: 2000: 21-25). No obstante, fue el principal aglutinante de muchas pinturas domésticas de interior a comienzos de los sesenta, siendo incorporada también por los artistas. De entre sus propiedades destaca su versatilidad, secado rápido, *óptima* formación de películas, resistencia y acabado mate a satinado-brillante, destacando su bajo coste.

Autores como Sidney Nolan, Kenneth Noland, Bridget Riley, Burri y Miró emplearon este tipo de medio (Learner, 2004: 1-3; Fernández y Juncosa, 2006: 18-19). Las obras en las que lo encontramos pueden estar realizadas con productos de fabricación, (pinturas industriales y/o domésticas, para artistas (por ejemplo, Flashe® de Lefranc & Burgeois) o manualidades (por ejemplo, La Pajarita®¹, Aqualux®), o bien a partir de la mezcla de pigmentos y cargas con aglutinantes vinílicos comerciales (por ejemplo, Vinavyl®, látex Rayt®), siendo este último un sistema que emplearon autores como Burri y Noland. Lo encontramos también en algunas obras de los valencianos Vicent Peris, Uiso Alemany y Horacio Silva, entre otros, siendo ampliamente empleado en las facultades de Bellas Artes debido a sus características y reducido coste.

Respecto a los problemas de estabilidad, en el transcurso de la investigación se detectaron dos tipologías de alteración, que pueden presentarse combinadas: pulverulencia en el caso de obras realizadas con pigmentos mezclados con aglutinante vinílico y levantamientos en el caso del uso de pinturas comerciales. De ahí que las probetas de la presente investigación *se inspiraron* en la problemática del lienzo *El màgic tanca un cercle* de Enric Solbes (óleo sobre pintura vinílica y loneta de algodón sin preparar) y 38 telas de gran formato de Peris y Alemany ejecutadas en los ochenta con látex vinílico, pigmentos y alquitrán sobre loneta de algodón sin preparar². La primera presentaba levantamientos puntuales a causa de un accidente, y las segundas, fallos cohesivos y adhesivos debido a la técnica y exposición a condiciones ambientales incorrectas.

Como es sabido, las intervenciones de adhesión y consolidación tienen una reversibilidad limitada. Además de los cambios de tipo óptico y de la afectación del concepto de la obra, pueden producirse cambios físicos, químicos y mecánicos; de ahí que los polímeros introducidos deban proporcionar uniones adhesivas y cohesivas correctas, compatibles y duraderas. Por tanto, cabe seleccionar los sistemas más seguros y los materiales más estables. En este sentido, la evaluación de la efectividad de los tratamientos suele reducirse al análisis de los cambios ópticos, sin que sea habitual estudiar a corto y largo plazo la viabilidad y capacidad adhesiva y/o cohesiva de los polímeros introducidos.

Según lo anterior, se establecieron como objetivos de la investigación el estudio del comportamiento óptico y el grado de adhesión y/o cohesión tras la consolidación y/o adhesión de pintura vinílica delaminada y/o pulverulenta, antes y después de su envejecimiento en condiciones ambientales no controladas de interior. A estos se suma la búsqueda de un protocolo experimental de evaluación que dé apoyo a este tipo de intervenciones, a través de la adaptación de la normativa industrial al campo de los bienes culturales. De este modo, tras realizar diversos test de resistencia al esfuerzo de pelado y tracción, se evaluó la cohesión y adhesión

¹ El uso de La Pajarita® se ha documentado en obras de Miró, Manuel Calvo y Enric Solbes.

² Intervenido por el IVC+R (2009-2011). *El màgic tanca un cercle* (restauradores: M.ª T. Pastor y A. Pellicer). Exposición *Un tiempo, un Espacio* (1982-1984), Vicent Peris y Uiso Alemany. Consorcio de Museos de la Comunidad Valenciana, 19-05-2011 al 04-09-2011 (restauradores: A. Ramírez, A. Pellicer, M.ª T. Pastor, P. D'Antoni, S. Cunha y M. Pimenta). Estudios científicos: IVC+R.



Figura 1. Detalle de *El màgic tanca un cercle* antes de la intervención y detalle de la protección y fallos cohesivos de los lienzos de Peris y Alemany. Solbes, *El Màgic tanca un cercle*, 1985, óleo y vinílico sobre lienzo, Ajuntament de Canals. Intervenido por el IVC+R. Fotografía: M.^a T. Pastor. Peris y Alemany, *Un tiempo un espacio*, 1982, propiedad de los artistas. Fotografía: M.^a T. Pastor.

resultante de la aplicación de tres consolidantes y tres adhesivos sobre probetas que simulaban pulverulencia y falta de adhesión en pintura vinílica.

2. Adhesión de pintura vinílica

A continuación se especifican los materiales y métodos empleados en el estudio de la estabilidad y viabilidad de tres polímeros empleados en adhesión de pintura vinílica, junto a los resultados y conclusiones obtenidos.

2.1. Materiales y métodos

2.1.1. Realización de probetas

Se prepararon tres grupos de muestras que simulaban falta de adhesión empleando una pintura comercial blanco titanio Acualux®. El grupo 0 realizado para obtener una referencia del nivel de adhesión que debían proporcionar los adhesivos estaba formado por diez probetas de 6 cm × 6 cm con un área central pintada de 2,5 cm × 2,5 cm, mediante el uso de un aplicador de capa Elcometer® 3850 (AENOR, 2003: 6). Los grupos A (probetas para la evaluación de la adhesión tras el curado) y B (probetas para la evaluación tras el envejecimiento de la unión

adhesiva) estaban constituidos por 20 probetas idénticas sin pintar³. Paralelamente se prepararon diversos *films* de pintura sobre una hoja de poliéster monosiliconado.

Tras una primera fase de secado de un mes a 50 ± 5 % HR y 23 ± 2 °C, cinco muestras del frupo 0 (grupo de referencia) y las películas sueltas de pintura fueron envejecidas en una cámara climática *Climacell Komfort-line* a 60 °C y 55 % HR (siete días) y 11 meses de envejecimiento natural en la oscuridad (Young, 2008: 73-80; AENOR, 1996: 1-10; AENOR, 2006: 1-16). Los *films* de pintura vinílica se cortaron en cuadrados de 2,5 cm × 2,5 cm⁴.

2.1.2. Selección y aplicación de adhesivos

En la selección de polímeros con función adhesiva (Plextol® B500, Acril® 33 y Aquazol® 500) se tuvo en cuenta su posible compatibilidad mecánica y la solubilidad de la pintura vinílica. Estos fueron aplicados a pincel sobre los rectángulos de pintura y la tela de algodón, tal y como suele realizarse en las intervenciones de restauración sin que se empleara ninguna fuente de calor para evitar el aumento del brillo. El curado se realizó bajo peso durante dos semanas a 23 ± 2 °C y 50 ± 5 %, controlando la cantidad de producto⁵ mediante pesado.

2.1.3. Envejecimiento acelerado

El grupo A previamente intervenido fue sometido a envejecimiento termohigrométrico acelerado en una cámara climática Weiss 180/40 WK3, según la tabla 1 (ASTM, 2010: 1-3).

Recorrido	Grupos	Condiciones
Secado	0, A y B	23°C +- 2°C y 50% HR +-5%
Envejecimiento Tipo A termohigrométrico	2 Ciclos (14 días, 336h)	24h (23°C-85% HR)
		24h (48'5°C-20%HR)
		72h (23°C-85%HR)
		48h (48,5°C-20%HR)
Envejecimiento Tipo B termohigrométrico y fotooxidativo	2 Ciclos (14 días, 336h)	24h (23°C-85% HR) + UV-A
		24h (48'5°C-20%HR) + UV-A
		72h (23°C-85%HR) + UV-A
		48h (48,5°C-20%HR) + UV-A

Tabla 1. Secado y ciclos de envejecimiento tipos A y B (ASTM). Tabla: M.^a T. Pastor Valls.

³ Soporte: retorta fina de algodón 100 % ligamento tafetán. 1 cm²: 31 hilos urdimbre-26 hilos trama. Se midió el grosor medio de los films de pintura (288,66 µm) y su pH de 8,69 tras el secado.

⁴ Almacenaje en la oscuridad a 23 °C ± 2 °C y 50 % HR ± 5 %.

⁵ Utilización de una báscula de precisión *BEL Engineering*.

2.1.4. Colorimetría y medida del brillo

Los cambios de color producidos tras la adhesión y envejecimiento de las muestras fueron evaluados con un espectrofotómetro *Konica Minolta CM-700d* y software *Spectra Magic NX*⁶, determinando índice de amarilleo (YI) y la diferencia de color (ΔE). Las medidas de brillo de los grupos 0 y A se llevaron a cabo antes, después de la aplicación de los productos seleccionados y tras el envejecimiento utilizando un brillómetro 20°, 60° y 85° *Elcometer® 407 Statistical Glossmeter*.

2.1.5. Evaluación del nivel adhesivo

A fin de evaluar el nivel adhesivo, las muestras se sometieron a un ensayo de tracción a 90°, midiendo la fuerza requerida para romper la unión del recubrimiento-sustrato (AENOR, 2003: 1-16). Teniendo en cuenta la relación de la masa del adhesivo aplicado con la tensión de rotura, se compararon los resultados obtenidos tras el curado y el envejecimiento.

Para ello, tras el secado de las muestras, se pegó una sufridera circular de aluminio de 2 cm Ø sobre la pintura empleando Araldit® Rápido, curando bajo peso en condiciones de equilibrio según la norma UNE-EN ISO 4624 (AENOR, 2003: 8-13). A su vez el montaje se adhirió sobre la base circular de la torre de comportamiento mecánico INSTRON 3345 con cinta de doble cara para evitar su deformación elástica y/o plástica. Previamente se cortó el adhesivo curado y la película pictórica hasta el sustrato. Sobre la muestra se depositó un anillo de metacrilato sujeto con gatos. Finalmente se colocó un dispositivo de aluminio encajado a la sufridera y mordazas⁷.

De este modo, se emplearon cinco probetas para cada ensayo, realizado en condiciones de 23 ± 2 °C y 50 ± 5 %. (AENOR, 2003: 13). Finalmente, con motivo de establecer el tipo de fractura, se realizó un análisis informático a partir de fotografías y el cálculo de píxeles (Corel Photo-Paint® 12 y/o Adobe® Photoshop CS3).



Figura 2. Esquema del test de tracción, detalle del montaje y ensayo de tracción. Estudio del tipo de rotura mediante recuento de píxeles. Imágenes y gráfico: M.^a T. Pastor Valls.

⁶ Condiciones de trabajo: rango espectral 400 nm-700 nm, intervalo de medida de 10 nm, iluminante D65, observador estándar de 10°, geometría óptica mediante sistema de esfera integradora de luz difusa d/8 (iluminación difusa, 8° ángulo detección), diámetro área de medida de 3 mm, componente especular excluido (SCE) y espacio de color CIEL*a*b*. Tres mediciones por muestra.

⁷ Condiciones de trabajo: célula de carga 500 N, velocidad constante de separación de las mordazas (10 mm/min) y aplicación del esfuerzo de tracción perpendicular al plano del sustrato pintado con rotura dentro de los primeros 90 segundos. En cada muestra se calculó la tensión de rotura (σ) en MPa y su estudio la naturaleza.

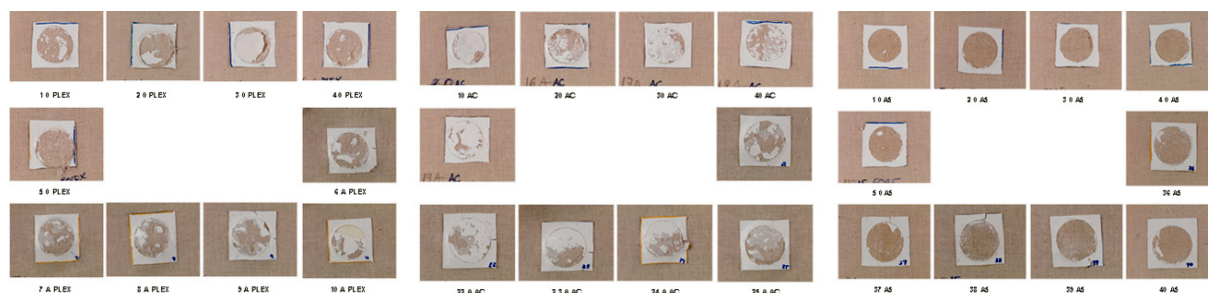


Figura 3. Detalle de muestras de los Grupos 0 y A tras el ensayo de tracción: Plextol® B500, Acril® 33 y Aquazol® 500. Imágenes: M.^a T. Pastor.

2.2. Resultados y discusión

2.2.1. Colorimetría y medición del brillo a 60°

Según los resultados, la coordenada que más varió tras el envejecimiento es la L^* . Así, en las probetas tratadas con Acril® 33 y Plextol® B500 se produjo un incremento de prácticamente un punto, lo que podría tener relación con la modificación de la textura y/o color de las muestras. No obstante, el ΔE^* obtenido fue <2 en los tres casos, siendo menor en el Aquazol® 500 y mayor en el Plextol® 500.

El brillo aumentó tras la intervención, siendo más alto con el Plextol® B500 que con el Aquazol® 500, si bien este disminuyó como el Acril® 33 debido a un arrugado de la superficie.

2.2.2. Test de arranque por tracción a 90°

Antes del envejecimiento la tensión de rotura de las muestras tratadas con Plextol® B500 y Acril® 33 era mayor que las del Aquazol® 200. A su vez, el nivel de adhesión aportada por los dos primeros fue superior a la de la pintura blanca Aqualux® sobre tela y menor para el tercero.

A una misma masa de adhesivo (0,078 g), la tensión de rotura media del Plextol® B500 aumentó tras el envejecimiento. La tensión de rotura proporcionada por el Acril® 33 pareció acercarse a la del Plextol® 500, si bien debido a la afectación física de las muestras y al margen de error, no fue posible determinar con exactitud su comportamiento tras el envejecimiento. Por su parte, el Aquazol® 500 proveyó una tensión de rotura que se mantuvo tras envejecer.

En cuanto al tipo de la rotura⁸ se distinguieron tres tipos de comportamiento. Destacó la rotura limpia del Aquazol® 200 con predominio de fallos tipo A/B y un bajo porcentaje de fallos D/E, frente a la rotura heterogénea del Plextol® B500 (predominio de rotura A/B, B/C) y Acril® 33. Este último con un predominio de la rotura tipo C relacionado con una posible afectación de la pintura debido a una mayor fuerza adhesiva respecto a la fuerza cohesiva de la pintura y/o al pH de este producto (pH: 9-10 en dispersión).

⁸ Rotura adhesiva del adhesivo respecto a la tela (A/B), rotura adhesiva del adhesivo respecto a la pintura (B/C), rotura cohesiva de la pintura (C), rotura adhesiva de la pintura respecto a la resina epoxi empleada en el montaje (C/D) y rotura adhesiva del adhesivo epoxi en cuanto a la sufridera metálica (D/E). La rotura D/E tendría relación con algún error del montaje de la muestra (engrasado de la pintura o sufridera).

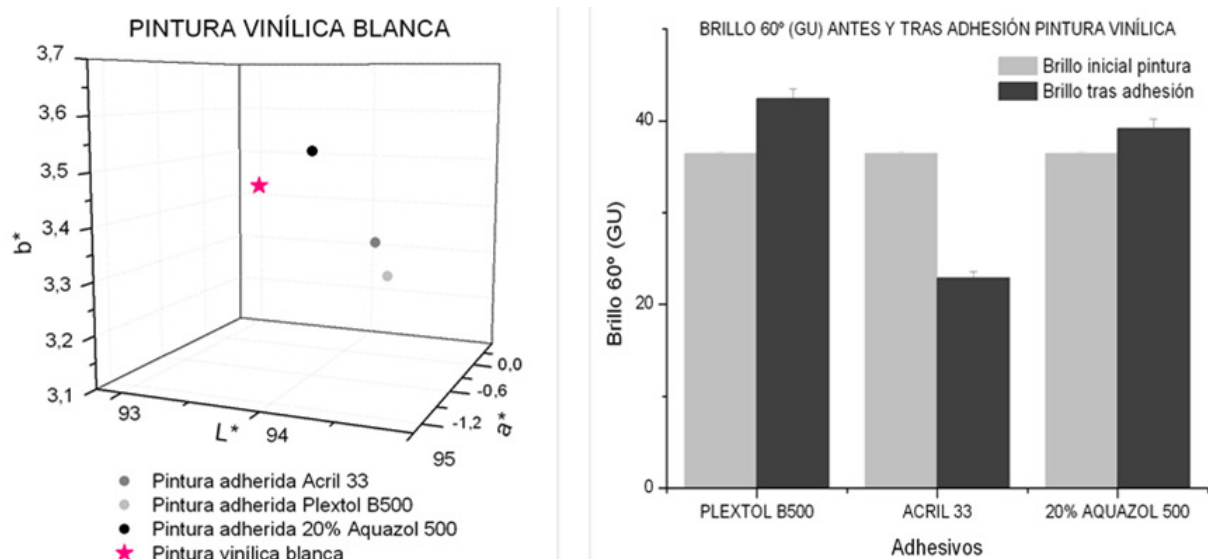


Figura 4. Coordenadas L*a*b* pintura vinílica y muestras adheridas. Brillo 60° antes y tras la adhesión. Imágenes: M.^a T. Pastor.

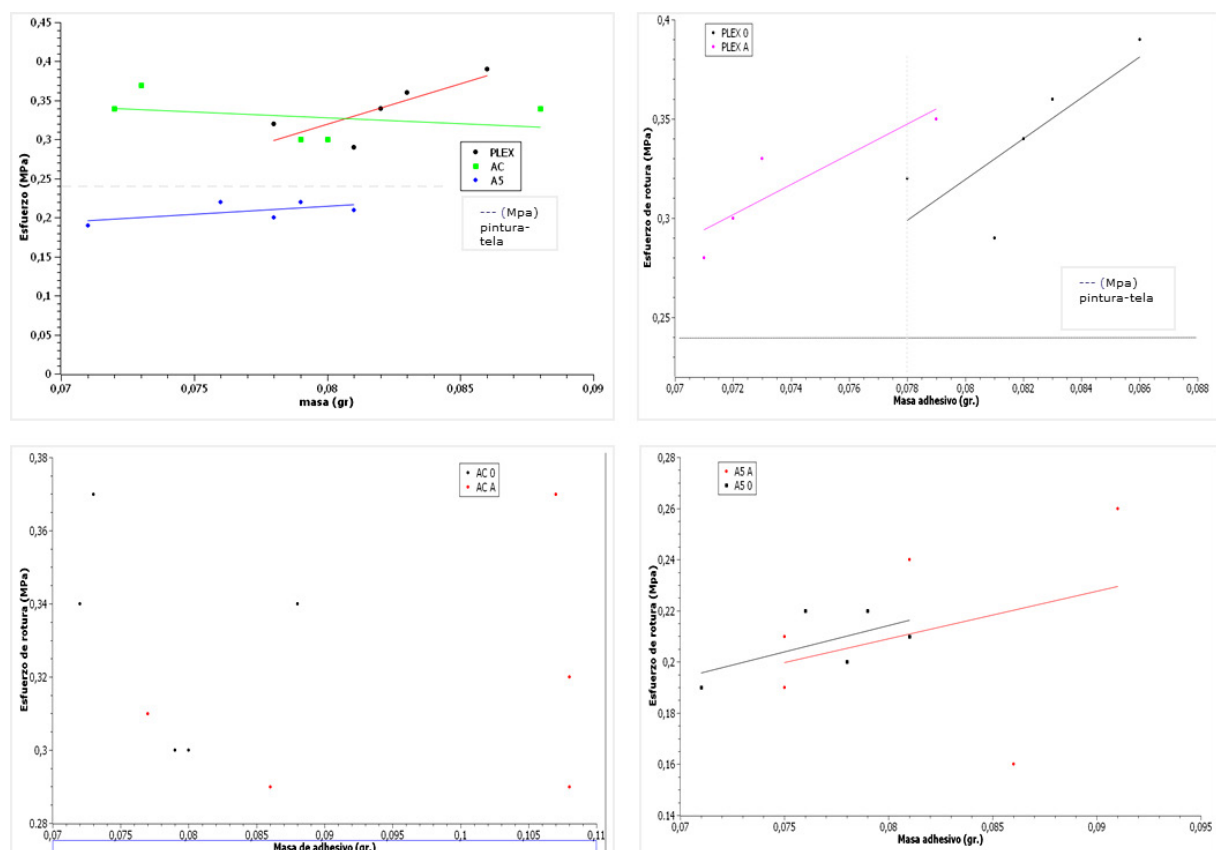


Figura 5. Plextol® B500, Acril® 33 y Aquazol® 500, tensión de rotura/masa adhesivo inicial (a). Plextol® B500 tensión de rotura tras envejecer (b). Acril® 33 tras envejecer (c). Aquazol® 500 tras envejecer (d). Gráficos: David Juanes y M.^a T. Pastor.

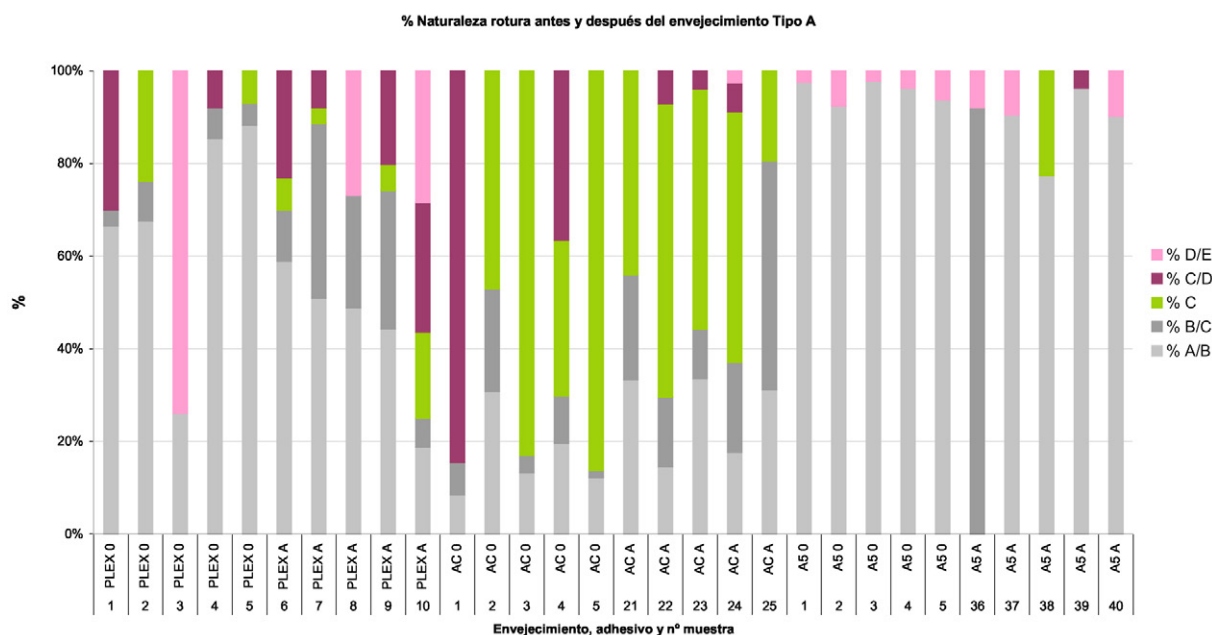


Figura 6. Porcentaje de naturaleza de la rotura antes y tras el envejecimiento tipo A. Gráficos: David Juanes y M.^a T. Pastor Valls.

Tras el envejecimiento el Plextol® B500, el modo de rotura A/B se mantuvo como el principal tipo de fractura, seguido del tipo B/C que aumenta y del C/D, apareciendo roturas tipo D/E y C. El Acril® 33 presentó un predominio de la rotura tipo C también después de envejecer, combinados con fallos A/B y B/C. Y el Aquazol® 500 disminuyó los fallos tipo A/B que siguieron siendo considerables seguidos de los D/E.

2.3. Conclusiones (adhesión de pintura vinílica)

La heterogeneidad de la disposición de los fallos de las muestras tratadas con Plextol® 500 y Acril® 33 contrastó con la homogeneidad de aquellas intervenidas con Aquazol® 500. La industria señala que lo más deseable es la obtención de un fallo cohesivo del adhesivo, lo cual indica su afinidad respecto a los sustratos a adherir. Sin embargo, en nuestro caso, el Aquazol® 500, seguido del Plextol® 500, presentaron un predominio de la rotura adhesiva del adhesivo respecto a la tela, y el Acril® 33, fallos cohesivos de la pintura, lo que es del todo preocupante.

Podemos concluir diciendo que, lejos de obtener unos resultados óptimos, el nivel de adhesión proporcionado por el Plextol® 500 y el Acril® 33 en pintura vinílica reciente (menor de un año) fue superior al nivel adhesivo de la pintura aplicada a pincel sobre tela, e inferior en el caso del Aquazol® 500. El Acril® 33 tendría una mayor afinidad por el sustrato textil que el resto.

El resultado no sería satisfactorio, pues lo ideal sería alcanzar una adhesión lo más similar posible a la del estrato original. El análisis de los datos indicó que aunque no llega a alcanzar la tensión de rotura de la pintura Aqualux® sobre tela, probablemente el Aquazol® 500 sea el producto más adecuado en comparación con los anteriores. Frente a sus limitaciones, cabría valorar como positivos los bajos cambios ópticos, el nivel adhesivo menor al de la pintura, su estabilidad, el predominio por el tipo de fractura A/B, junto su homogeneidad. En contraste, destacamos los malos resultados del Acril® 33 para este tipo

de pintura, el cual además produjo cambios ópticos no deseables (disminución del brillo por posible arrugado), unidos al efecto irregular del Plextol® B500, con un aceptable ΔE^* , aumento del brillo y una pequeña pero preocupante afectación de las muestras (rotura tipo C).

3. Consolidación de pintura vinílica

A continuación se especifican los materiales y métodos empleados en el estudio de la estabilidad y viabilidad de tres polímeros empleados en consolidación de pintura vinílica, junto a los resultados y conclusiones obtenidos.

3.1. Materiales y métodos

3.1.1. Realización de probetas

Se formaron cuatro grupos de muestras de 5 cm × 17 cm: grupo patrón, grupo 0 (muestras consolidadas), A y B (muestras consolidadas y envejecidas empleando dos tipos distintos de envejecimiento acelerado: termohigrométrico y termohigrométrico-fotooxidativo). Cada uno de los grupos estaba compuesto a su vez por ocho muestras realizadas con ambos pigmentos, con excepción del grupo patrón formado por dos de estas. Estos simulaban un estrato pictórico con alto PVC empleando medio vinílico Conrayt® y los pigmentos de CTS blanco de titanio y azul ultramar sobre loneta de algodón. El color se aplicó con un aplicador de capa *Elcometer*® 3850 en un área de 3 cm × 15 cm (AENOR, 1996: 1-10; AENOR, 2006: 1-16). A fin de obtener una pintura mate,

ligeramente pulverulenta y sensible al roce, se eligió un 92,59 % de concentración ponderal de pigmento, (CPP) (Roche; Ottolini y Riggiardi, 2009: 144-145). El secado y curado fue idéntico al especificado para las muestras de adhesión.

3.1.2. Selección y aplicación de los consolidantes

Teniendo en cuenta el acabado mate de las probetas junto a su grado de pulverulencia, se seleccionaron como posibles consolidantes el Aquazol® 200, el Gelvato® y funori. Estos fueron aplicados empleando un nebulizador por ultrasonidos ZFB® a fin de minimizar los cambios ópticos sobre la superficie en una concentración del 1 %, exceptuando la del funori, que se redujo a 0,25 % debido a su viscosidad. Se dieron seis pasadas previa humectación por nebulización con agua desionizada, controlando la cantidad mediante pesado. Las muestras se dejaron secar durante dos semanas en condiciones controladas de 23 ± 2 °C y 50 ± 5 %.



Figura 7. Nebulizador por ultrasonidos ZFB® y probetas. Imagen: M.^a T. Pastor.

3.1.3. Envejecimiento acelerado tipos A y B

Tras el secado, los grupos A y B intervenidos se envejecieron en una cámara Weiss 180/40 WK3 (tipo A) y en una *Climacell* (tipo B). Ver condiciones de envejecimiento en tabla 1 (. 305).

3.1.4. Colorimetría y brillo

Los cambios de color se evaluaron empleando el mismo sistema descrito en el punto 2.2.1. Además de obtenerse las coordenadas cromáticas L^* , a^* , b^* (CIE 1976), se obtuvieron las diferencias ΔE^* , ΔL^* , ΔH^* y ΔC^* para las muestras azules y las diferencias ΔE^* , ΔL^* , Δa^* y Δb^* para las blancas. Por su parte, se empleó un ángulo de 85° para las mediciones de brillo (AENOR, 1994: 1-16; AENOR, 1999: 1-16)⁹. Además, las muestras sin intervenir fueron analizadas con SEM a fin de obtener una mejor comprensión de los resultados obtenidos y visualizar su morfología.

3.1.5. Evaluación del nivel cohesivo

Esta se realizó tras la consolidación y envejecimiento mediante un test a 90° , utilizando una rampa de pelado INSTRON 2820 035 y torre INSTRON 3345 según la norma UNE-EN 28510. De esta forma, se empleó un montaje para cada ensayo (cuatro muestras por consolidante): sin intervenir (grupo patrón), muestras tratadas sin envejecer (grupo 0) y envejecidas (grupo A: envejecimiento termohigrométrico y B: envejecimiento termohigrométrico y fotooxidativo), el cual se efectuó a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y $50 \pm 5\%$ HR, adhiriendo una cinta adhesiva sobre la muestra¹⁰ inmovilizada en la rampa de pelado (AENOR, 1992: 6-8; AENOR, 1993: 5; AENOR, 1995: 7). Con motivo de forzar la medida de la cohesión, no se practicaron cortes en forma de damero sobre la pintura, ejecutando el ensayo de pelado a velocidad constante de 50 mm/min, célula de carga de 500 N y ángulo de 90° .

Se determinó la fuerza media de pelado por tramo a fin de detectar problemas de uniformidad en la cohesión tras la consolidación de las muestras (cinco tramos de 25 mm) y la media general, estudiando el tipo de fallo: rotura adhesiva, cohesiva o rotura del adherente¹¹. Además, se realizó un análisis informático de las imágenes en alta resolución tal y como expusimos (punto 2.1.5).

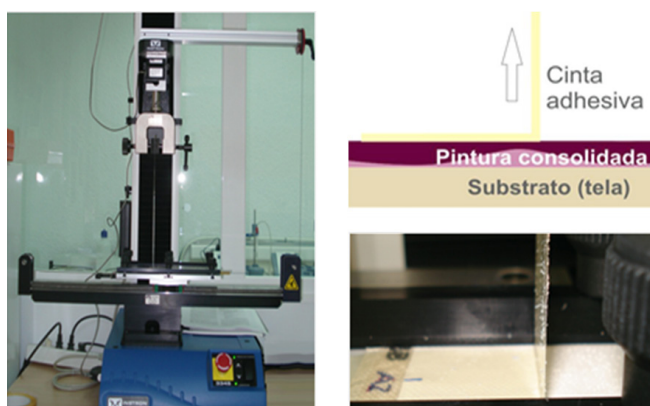


Figura 8. Esquema test de pelado a 90° , muestras y montaje en rampa de pelado 90° . Gráfico e imágenes: M.^a T. Pastor.

⁹ Se tomaron cuatro medidas por muestra obteniendo el promedio.

¹⁰ Dicha cinta se asentó frotando con los dedos y mediante la ayuda de una goma de borrar.

¹¹ Se descartaron los primeros 10 mm para evitar errores en la medida. Se anotó el tipo de fallo guardando la cinta y la muestra como referencias. Los picos representan el máximo de resistencia opuesta por la pintura a la separación, y los valles, el tramo de caída de la resistencia tras el despegado de la cinta.

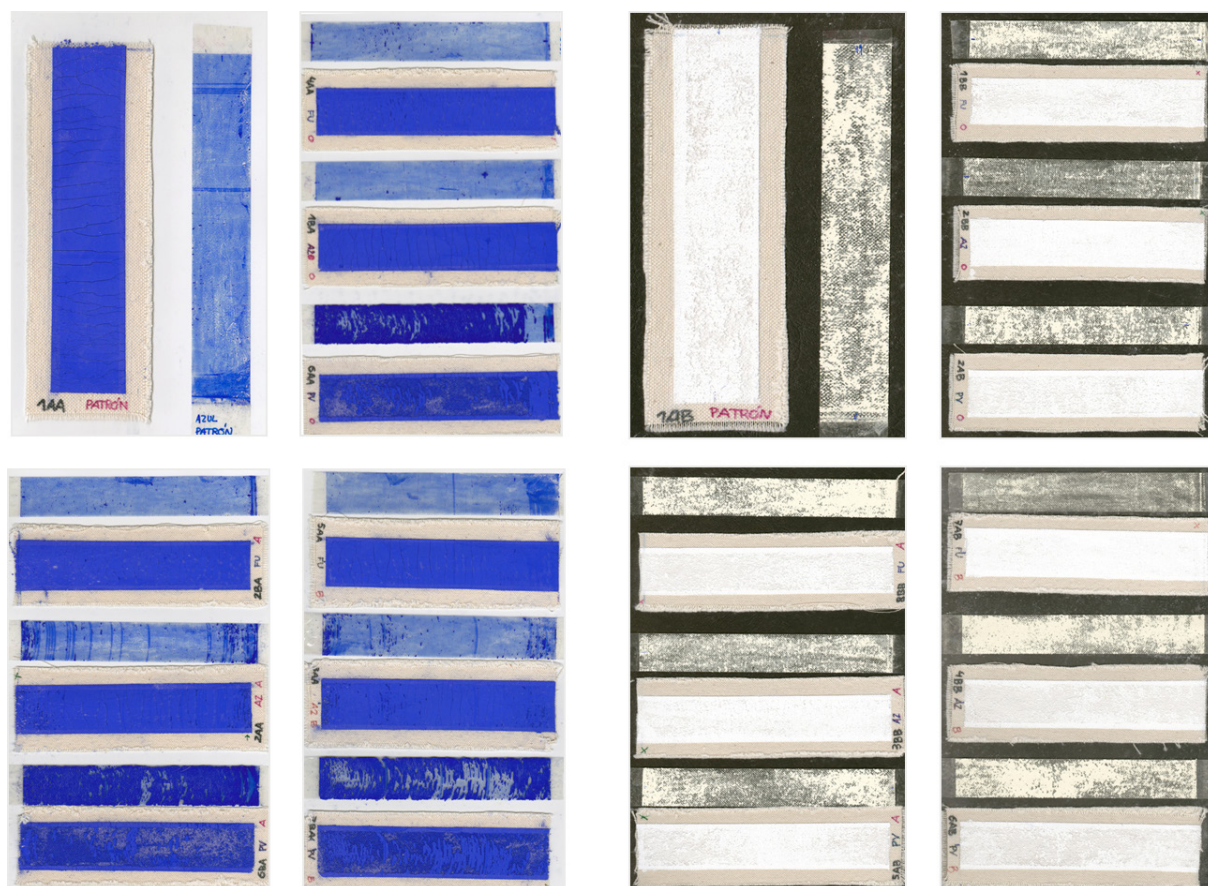


Figura 9. Azul ultramar y blanco de titanio tras el test, cintas de pelado y muestras (patrón y envejecidas): Funori, Aquazol® 200 y Gelvatol®. Imágenes: M.^a T. Pastor.

3.2. Resultados y discusión

3.2.1. Colorimetría y brillo

Según se observó mediante el SEM, las partículas de pigmento azul ultramar eran mucho más grandes y angulares que las del blanco titanio, confiriendo, por tanto, una superficie con mayor porosidad y de menor brillo que las blancas, las cuales presentaban partículas de pequeño tamaño dispuestas de forma más próxima y compactada con zonas puntualmente porosas.

Tras la consolidación de las muestras azul ultramar se obtuvo un $\Delta E^* < 1$ para los tres polímeros antes de envejecer, junto a variaciones bajas de luminosidad (ΔL^*), tono (ΔH^*) y saturación (ΔC^*). Tras el envejecimiento tipo A y teniendo en cuenta los márgenes de error, el Aquazol® 200 y Gelvatol® proporcionaron unos valores de $\Delta E^* < 1$ y de $\Delta E^* < 1,34$ en el caso del funori. Los tres darían también unos $\Delta L^* < 1$, $\Delta H^* < 1$ y $\Delta C^* < 1$. Sin embargo, tras el envejecimiento tipo B los cambios dejaron de ser aceptables (ΔE^* de 3,8 a 3), siendo el Gelvatol el más bajo y el Aquazol® 200 el más alto. Esto vendría indicar un incremento de la inestabilidad del pigmento azul ultramar en combinación con los consolidantes. En general, en las muestras blancas sin envejecer y envejecidas se obtuvo un $\Delta E^* < 1$, con $\Delta L^* < 1$, $\Delta a^* < 1$ y $\Delta b^* < 1$, exceptuando el Aquazol® 200 tras el tipo B con un $\Delta E^* < 1,42$.

Tanto las muestras azules como las blancas aumentaron el brillo al ser consolidadas. En las muestras azules el Aquazol® 200 confirió el menor cambio. Tras el envejecimiento termohigro-

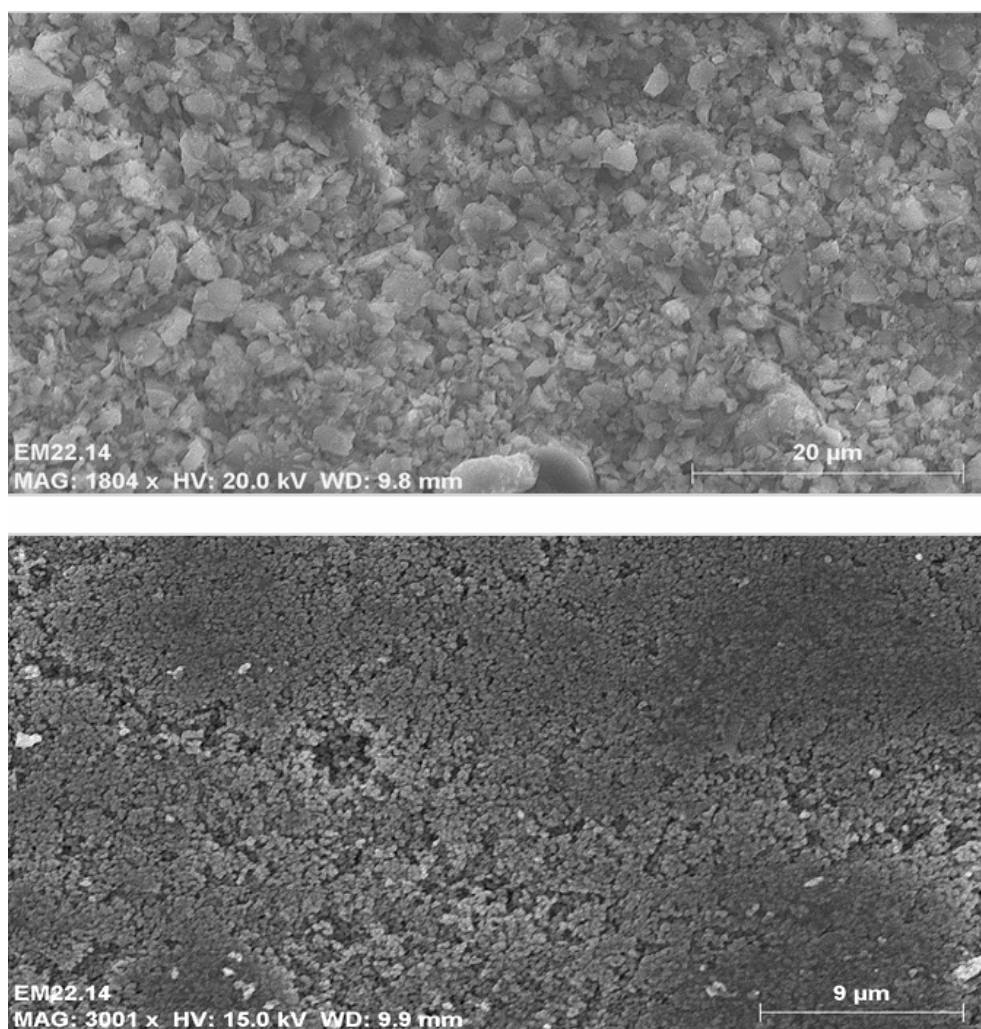


Figura 10. Imagen SEM (1804x y, 3001x), muestra vinílica azul y blanco titanio antes de consolidar. Imágenes: David Juanes.

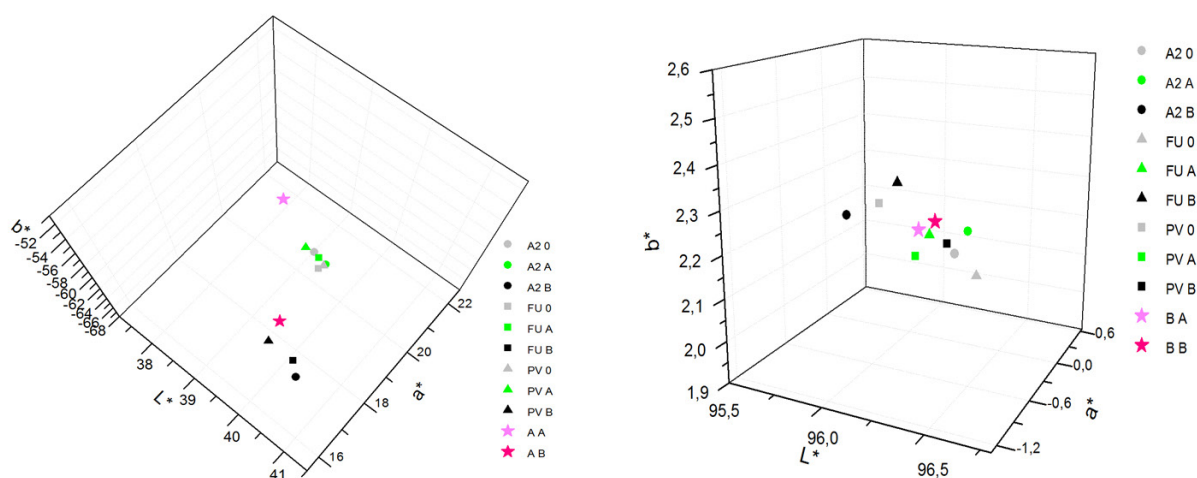


Figura 11. Muestras azules y blancas. Representación 3D media coordenadas Lab muestras no consolidadas envejecidas (AA y AB), consolidadas antes (0) y envejecidas (A y B). Gráficos: M.^a T. Pastor.

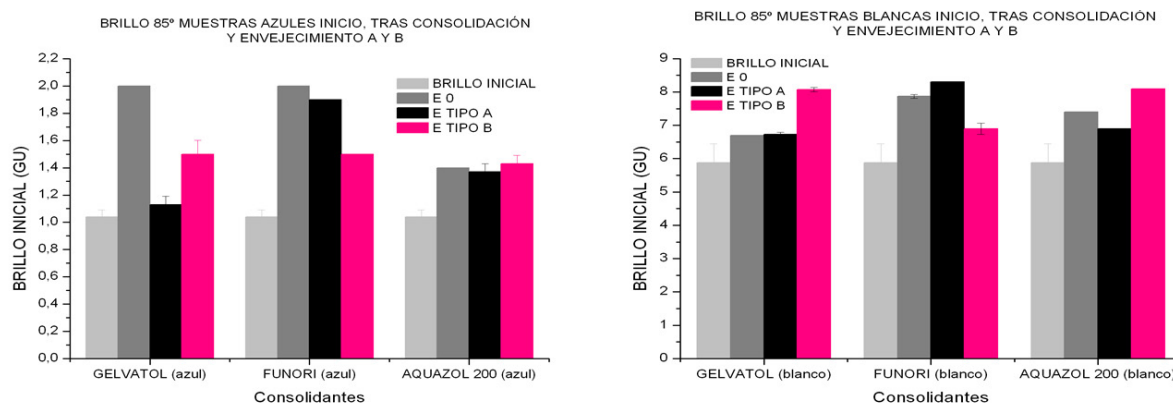


Figura 12. Brillo 85° muestras azules y blancas, inicio, consolidadas y tras envejecimiento A y B. Gráficos: M.^a T. Pastor.

métrico se produjo una disminución del brillo, siendo menor con el Aquazol® 200 y mayor con el Gelvatol®. Tras el envejecimiento tipo B, el Aquazol® 200 aumentó el brillo proporcionando el menor cambio. El resto de productos disminuyó significativamente este valor.

En las muestras blancas el producto que menos incrementó el brillo fue el Gelvatol®, mientras que funori produjo un aumento del 33,8 %. Tras el envejecimiento se mantuvo el buen resultado del Gelvatol®. El Aquazol® 200 produjo los mayores cambios tras el envejecimiento. En general, los cambios fueron imperceptibles a simple vista en todos los casos¹².

En contraste con los resultados esperados para el funori, las muestras blancas cambiaron menos con el Gelvatol® y las azules con el Aquazol® 200. Esto parece indicar que el incremento o descenso del brillo no parece depender solo del consolidante, si no de su interacción con el tipo de pigmento y/o tipo de capa formada.

3.2.2. Medición del nivel cohesivo: test de pelado a 90°

Las pruebas pusieron de manifiesto que la cohesión inicial de las muestras blancas era superior a las de las azules sin tratar. La consolidación de las muestras azules fue por lo general bastante homogénea, sobre todo con el Gelvatol®, que aportó una profunda cohesión (estrato adherido en bloque a la cinta un 81,96%), mientras que el resto proporcionó una cohesión superficial. El Aquazol® 200 se situó en segundo lugar con un esfuerzo de pelado medio de 2,37 N, seguido del funori. En las muestras sometidas al envejecimiento tipo B, tratadas con funori y Aquazol® 200, la consolidación fue más irregular.

El envejecimiento de las muestras consolidadas produjo una variación de la cohesión tanto en forma de aumento como de descenso. Tras el envejecimiento A y B el Gelvatol® incrementó el esfuerzo de pelado, respecto a la muestra consolidada no envejecida. Las muestras consolidadas con funori y Aquazol® 200 descendieron este valor quedando por debajo del obtenido tras la consolidación, siendo en el segundo más evidente.

En contraposición a las probetas azules, la consolidación de las muestras blancas fue un tanto más heterogénea, con excepción del Gelvatol® sin envejecer, y las intervenidas con fu-

¹² Ninguno de los tres ha superado los 2 GU respecto a las muestras azules, ni los 8,2 GU en las blancas.

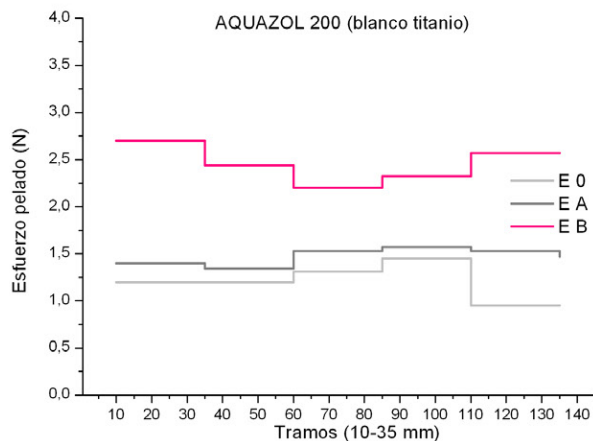
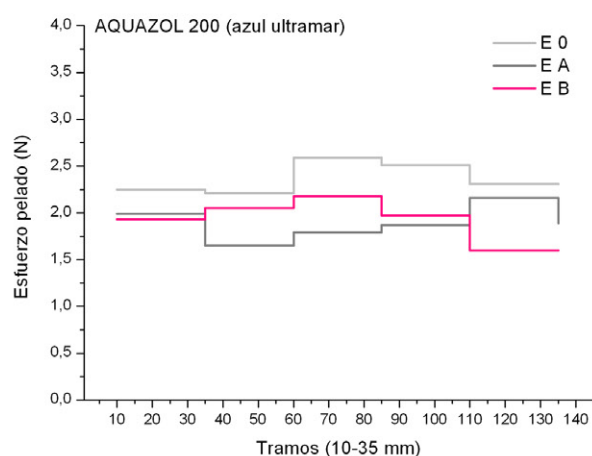
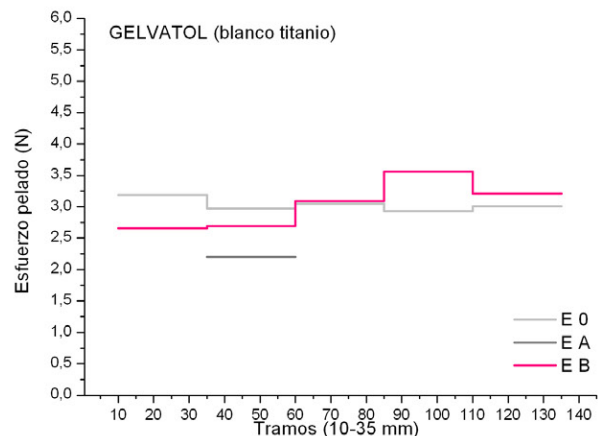
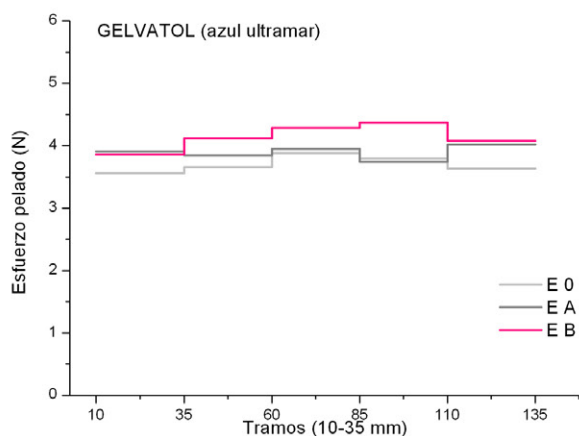
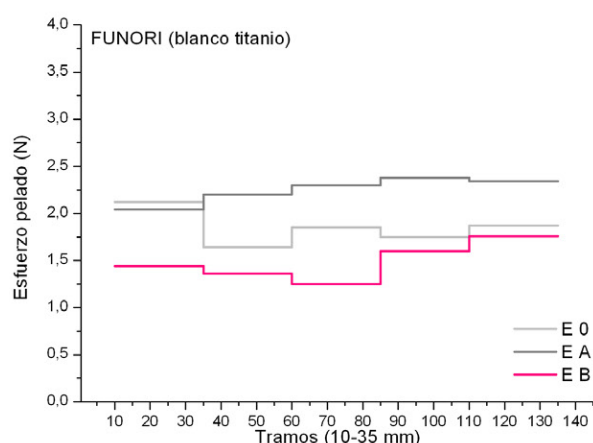
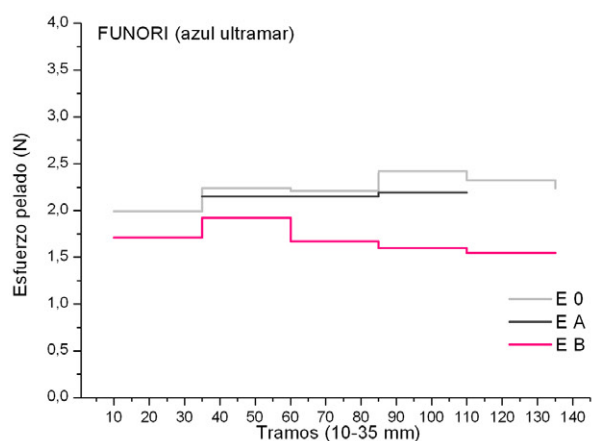


Figura 13. Muestras blanco titanio. Gelvatol®, funori y Aquazol® 200. Gráficas esfuerzo de pelado a 90° (N) por tramos (10-135 mm), muestras consolidadas (0) y envejecidas (A y B). Gráfico: M.º T. Pastor.

Figura 14. Muestras azul ultramar. Gelvatol®, funori y Aquazol® 200. Gráficas esfuerzo de pelado a 90° (N) por tramos (10-135 mm), muestras consolidadas (0) y envejecidas (A y B). Gráfico: M.º T. Pastor.

nor y Aquazol® 200 envejecidas en el programa tipo A. Según esto, tras la consolidación todas las muestras incrementaron la media de esfuerzo de pelado a 90°, a excepción de aquellas tratadas con Aquazol® 200. Este debilitó la cohesión de las muestras al obtener un valor negativo de -0,27 N, situación que pudo observarse con el análisis de las muestras y cintas de pelado.

El Gelvatol® fue el producto con mayor capacidad consolidante, situándose en segundo lugar el funori. Debido a las características de la capa formada por el pigmento blanco titanio, ambos polímeros proporcionaron una consolidación un tanto irregular a causa de una penetración también irregular. No obstante, el Gelvatol® (> % rotura adhesiva pintura-substrato) penetró mejor que el funori (> % rotura cohesiva pintura). Tras el envejecimiento se produjo una variación de los valores de esfuerzo de pelado a 90°. Las muestras con Gelvatol® disminuyeron un 33,33 % la media de esfuerzo, aumentando en un porcentaje similar en el B.

El funori superó la media de esfuerzo de las muestras consolidadas, descendiendo un 20 % en el B, quedando por debajo de estas. El envejecimiento produjo en las muestras consolidadas con Aquazol® 200 un aumento del esfuerzo de pelado, siendo enormemente mayor en el tipo B al producirse un incremento del 99,19 %, el cual superó el valor de la muestra consolidada sin envejecer. No obstante, este último no alcanzó el resultado del Gelvatol®.

3.3. Conclusiones (consolidación de pintura vinílica)

Tras la aplicación del consolidante todas las muestras incrementaron los valores de la media de esfuerzo de pelado, exceptuando las muestras blancas tratadas con Aquazol® 200. Antes de su envejecimiento se puso de manifiesto la mayor capacidad consolidante del Gelvatol® en ambos tipos de pigmento (aumento del 170,8 % y 102 %), si bien, y esto es común para los tres polímeros ensayados, los valores de esfuerzo fueron menores en las muestras blanco titanio. El tipo de morfología superficial y la menor porosidad y lenta absorción de las capas podría explicar esta diferencia. Tras el envejecimiento el Gelvatol® aumentó el esfuerzo de pelado en las azules, y en las blancas, lo hizo el Aquazol® 200.

Los resultados del test de pelado a 90° pusieron de relevancia su dependencia respecto al tipo de pigmento, siendo las muestras azules las que plasmaron una mayor resistencia al despegado.

El consolidante que proporcionó mejores resultados en ambas muestras fue el Gelvatol® si bien el funori tuvo una buena consolidación antes de envejecer (1BB FU) y una mejor distribución en la muestra blanca 8BB FU (envejecimiento tipo A). El Aquazol® 200 rozó el 83 % de la superficie consolidada en la muestra blanca 4BB (envejecimiento tipo B). Este producto tuvo un comportamiento aceptable en cuanto a las variaciones de color en las muestras blancas, si bien tras el envejecimiento tipo B llegó a un $\Delta E^* < 1,42$. Sin embargo tras este tipo de envejecimiento dejó de ser aceptable en las muestras azules, junto al resto de productos (ΔE^* de 3 a 3,8).

También se comprobó que el brillo aumentó tras la consolidación de las muestras, manteniéndose dicho nivel tras el envejecimiento.

Otro resultado relevante del test de pelado a 90° apuntó a que la consolidación no fue totalmente homogénea, sobre todo en el caso de las muestras blanco titanio, probablemente debido a la dificultad técnica de su consolidación mediante nebulización y a las particularidades de los estratos formados por este material. Es decir, mientras que la consolidación de las

muestras azules era sencilla, al realizar las distintas aplicaciones sobre las muestras blancas, la capa parecía expulsar el producto formando una mayor acumulación de «vapor» sobre la superficie. Lo anterior, junto con las irregularidades de consolidación de las muestras, pudo tener su origen en la menor porosidad de las capas y en la heterogénea distribución de zonas más o menos compactadas de pigmento-aglutinante (menos absorbentes). Por tanto, cabría realizar una aplicación del consolidante en concordancia con el material, esto es, más depurada en las muestras azules y más lenta y secuenciada en el tiempo en las blancas.

En definitiva, los resultados apuntan a que un buen resultado óptico no implica un buen resultado a nivel cohesivo, evidenciando que mediante una pequeña cantidad de consolidante (por ejemplo, 0,0073 a 0,00131) se producen notables mejoras en la cohesión de las muestras, ya que no parece haber una relación clara entre dicha cantidad y los valores de esfuerzo de pelado obtenidos. Esto es, no es cierto que a mayor cantidad de producto se produzca una mayor resistencia al pelado.

El análisis informático de las imágenes de las muestras y cintas de pelado, basado en el recuento de píxeles y el porcentaje estimado de la consolidación, resultó un método práctico y fiable a la hora de corroborar los resultados de esfuerzo de pelado a 90° de las muestras blancas, si bien dió errores en las azules a causa del recuento de ciertas acumulaciones localizadas en las cintas.

La fuerza cohesiva de los polímeros varió tras el envejecimiento y dependió tanto de la distribución del consolidante como de las interacciones físico-químicas consolidante-pigmento. Es decir, los consolidantes interactuaron con los materiales constitutivos de las muestras de forma distinta, produciéndose variaciones dependiendo del tipo de pigmento, así como pérdidas y aumentos de cohesión. De ahí, que no pudiera establecerse una relación clara entre la estabilidad del polímero fuera y dentro de la muestra tratada, en cuanto a la cohesión proporcionada, ni en determinar si las fuerzas intermoleculares son menores en el consolidante que en relación al pigmento-aglutinante, sin ahondar en este tipo de interacciones formadas, lo cual no era objeto de este estudio. Así mismo, cabría tener en cuenta el comportamiento mecánico y dimensional resultante tras la consolidación, además de la estabilidad química de los polímeros empleados, como también las condiciones ambientales de exposición y almacenaje de las obras intervenidas.

4. Conclusiones generales

La adaptación de la normativa vigente para la evaluación de recubrimientos pictóricos y adhesivos, aplicada a los ensayos de adhesión y consolidación de estratos pictóricos en obras de arte, junto al análisis informático de imágenes en el estudio de la tipología de roturas, puede ser de gran interés y utilidad en el ámbito de la conservación y restauración.

Respecto a los test de adhesión, se ponen de relevancia los distintos niveles superiores e inferiores a la pintura obtenidos por los adhesivos respecto al estrato a estabilizar, la variación de estos niveles tras el envejecimiento termohigrométrico, la influencia de la cantidad de adhesivo aplicado sobre el nivel de adhesión, la distribución heterogénea de los puntos de fallo adhesivo aun cuando el producto se ha aplicado homogéneamente y la posibilidad de afectación del estrato pictórico por el adhesivo (rotura cohesiva de la pintura).

En cuanto a los consolidantes, todo parece indicar que la fuerza de pelado varía tras el envejecimiento y depende de la distribución y de las interacciones físico-químicas consolidan-

te-pigmento, puede debilitar la cohesión inicial de un material y afectar a su aplicación. Según lo anterior, una pequeña cantidad de consolidante puede otorgar notables mejoras en la cohesión de las muestras, si bien no parece haber una relación clara entre esta y los valores de esfuerzo de pelado obtenidos. Un buen resultado óptico no implica un buen resultado a nivel cohesivo.

5. Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada gracias al Instituto Valenciano de Conservación y Restauración de Bienes Culturales IVC+R-CulturArts, a la Fundación ICO, Departamento de Química Inorgánica y Orgánica de la UJI e Instituto de Tecnología Cerámica (ITC) en el contexto de la tesis doctoral *Estudio de sistemas y tratamientos de estabilización de capas pictóricas no protegidas en pintura contemporánea. Criterios y metodologías de actuación*¹³.

6. Bibliografía

- AENOR (1996): *Pinturas y Barnices. Examen y preparación de las muestras para ensayo*. UNE-EN ISO 1513. Madrid: AENOR.
- (2006): *Pinturas y Barnices. Probetas normalizadas para ensayo*. UNE-EN ISO 1514. Madrid: AENOR.
- (1999): *Pinturas y Barnices. Determinación del brillo especular de películas de pintura no metálicas a 20°, 60° y 85°*. UNE-EN ISO 2813. Madrid: AENOR.
- (2003): *Pinturas y Barnices. Ensayo de adherencia por tracción*. UNE-EN ISO 4624. Madrid: AENOR.
- (2000): *Pinturas y Barnices. Determinación del espesor de película*. UNE-EN ISO 2808. Madrid: AENOR.
- (1994): *Pinturas y Barnices. Colorimetría*. UNE 48-073-94. Madrid: AENOR.
- (1993): *Adhesivos. Ensayo de pelado para una unión encolada de adherente flexible sobre rígido*. Parte: 1. Pelado a 90°. UNE-EN 28510-1. Madrid: AENOR.
- ASTM (2010): *Standard Practices for Resistance of Adhesives to Cyclic Laboratory Aging Conditions*. ASTM D1183-03. ©ASTM International, West Conshohocken: ASTM, pp. 1-3.
- BORGIOI, L., y CREMONESI, P. (2005): *Le resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome*. Saonara: Il Prato.
- CCI (2011): «Adhesives and Consolidants Symposium 2011» [en línea]. Canadian Conservation Institute Web. Disponible en: <www.cci-icc.gc.ca> [consulta: 20 de marzo de 2012].
- CTS (2007): «Pigmentos puros CTS» [en línea]. *CTS Italia*. Disponible en: <www.ctseurope.com> [consulta: 19 de junio de 2011].
- FERNÁNDEZ-VILLA, S., y JUNCOSA DARDER, E. (2006): «Materiales y técnicas pictóricas de Joan Miró. Problemática de conservación». *VII Reunión de Arte Contemporáneo GEIIC*. Madrid: MNCARS-GEIIC, pp. 15-22.
- HORIE, V. (2010): *Materials for conservation: organic consolidants, adhesives and coatings* (2.^a ed.). Londres: Butterworth, Heinemann.

¹³ Tesis defendida por M.^a Teresa Pastor Valls, dirigida por Carmen Pérez García, Pilar Roig Picazo y David Juanes Barber dentro del Programa de Doctorado de Conservación y Restauración del Patrimonio Pictórico, Departamento de Conservación y Restauración de Bienes Culturales, Universitat Politècnica de València. Con la calificación sobresaliente Cum Laude, obtuvo el Premio Extraordinario de Tesis UPV 2016.

- INDUSTRIAS TITAN (2009): *Ficha datos de seguridad 91/155/CE y ficha técnica Acualux Blanco Satinado Cod. 0920800*. Industrias Titan, S. A. El Prat de Llobregat, Barcelona, pp. 1-8.
- LABORATORIOS RAYT (2008): *Ficha técnica Látex Extra Brillante Conrayt*. Badalona: Laboratorios Rayt, S. A., 2005.
- (2008): *Ficha datos de seguridad Látex Extra Brillante Conrayt*. Badalona: Laboratorios Rayt, S. A., pp. 1-3.
- MECKLENBURG, M. (2007): *Failure mechanisms in canvas supported paintings: approaches for developing consolidation protocols*. Padova: Il Prato.
- MICHALSKI, S. (2008): «Un modello fisico del processo di consolidamento, applicato principalmente ai dipinti». *Materiali e Metodi per il Consolidamento e Metodi Scientifici per Valutarne l'efficacia*. Atti del congresso CESMAR7, Milán, 2006. Padua: Il Prato.
- ROCHE, A.; OTTOLINI, S., y RIGGIARDI, D. (2009): «Studio meccanico del potere consolidante di alcuni adesivi in rapporto a cariche e pigmenti utilizzati in pittura». *L'attenzione alle superfici pittoriche*. Atti Congresso CESMAR7. Saonara: Il Prato, pp. 144-145.
- SOUSA-SILVA, M.; DOMÉNECH CARBÓ, M. T.; MARTÍN REY, S.; FUSTER LÓPEZ, L., y MARTÍNEZ BAZÁN, M. L. (2006): «Evaluation of Mechanical and Optical Properties of Consolidants Used in the Treatment of a PVAC Contemporary Painting». *Preprints 16th International Meeting on Heritage Conservation*. Valencia: UPV, pp. 423-436.
- VV. AA. (2008): *L'Attenzione alle superfici pittoriche. Materiali e Metodi per il Consolidamento e Metodi Scientifici per Valutarne l'efficacia*. Atti del congresso CESMAR7, Milán, 2006. Padua: Il Prato.
- VV. AA. (2009): *L'Attenzione alle superfici pittoriche. Materiali e Metodi per il Consolidamento e Metodi Scientifici per Valutarne l'efficacia*. Atti del congresso CESMAR7, Milán, 2008. Padua: Il Prato.
- YOUNG, Ch. (2008): «Sviluppo di test meccanici per valutare i consolidanti usati per i dipinti su tela». *L'Attenzione alle superfici pittoriche*. Atti CESMAR7, Milán, 2006. Padua: Il Prato, pp. 73-80.

Conservación y restauración del patrimonio paleontológico: innovación técnica en limpieza con láser y papetas en fósiles del yacimiento paleontológico de Lo Hueco

Manuel Blanco

Colaborador IPCE-UNED.
rutiloblanco@gmail.com

Fátima Marcos-Fernández

UCM, Grupo de Biología Evolutiva UNED.
fmarcos03@gmail.com

Paula Ruiz-Gómez

Colaboradora IPCE-UNED
pau.r.gomez@gmail.com

Soledad Díaz

Instituto del Patrimonio Cultural de España
soledad.diaz@meecd.es

Francisco Ortega

Grupo de Biología Evolutiva UNED
fortega@ccia.uned.es

Resumen: En el año 2007 se localizó en el paraje de Lo Hueco (Fuentes, Cuenca) un yacimiento con vertebrados fósiles del Cretácico Superior. Durante la excavación, se recuperaron más de 8000 restos fósiles entre los que destacan por su singularidad un conjunto de unos veinte esqueletos parciales de dinosaurios titanosaurios en conexión anatómica.

Los fósiles presentan problemas de conservación derivados del tipo de roca que los envuelve y rellena (con arcillas, yesos y óxidos de hierro), que impide, por un lado, el tratamiento y estabilización del fósil y, por otro, el estudio de las piezas. Es necesario aplicar tratamientos fiables que eliminen los recubrimientos sin comprometer la estabilidad y posible pérdida de material.

La utilización de técnicas de limpieza basadas en la ablación láser, el uso de disoluciones gelificadas o la combinación de ambas pueden proporcionar una alternativa en situaciones en las que se desaconseja la aplicación de las técnicas tradicionales. En este proyecto se ha realizado el análisis de algunos de estos tratamientos usando como referencia los fósiles del yacimiento de Lo Hueco.

Palabras clave: Paleontología, preparación-restauración, láser, geles, óxidos de hierro.

Abstract: In 2007, a paleontological site with vertebrate fossils from Late Cretaceous was discovered in Fuentes (Cuenca Province). During excavation, more than 8000 fossils were retrieved among which the most singular are a set of 20 partial skeletons of titanosaurian sauropods in anatomic connection.

The fossils present conservation problems derived from the complex matrix (with clays, gypsum and iron oxides) that enclose and fill them. This matrix does not allow the treatment and stabilization of the specimens nor their direct visual inspection. Therefore, it is necessary to apply reliable treatments that selectively remove the coatings without compromising stability, and voiding the loss of material.

The use of cleaning techniques based on laser ablation, solvent gels or their combination can be an alternative in those cases in which the use of traditional cleaning techniques is not recommended. In this project we analyze some of these treatments on samples from the paleontological site of Lo Hueco.

Keywords: Paleontology, preparation-restoration, laser cleaning, gel cleaning, iron oxides.

Introducción

El yacimiento paleontológico de Lo Hueco fue descubierto en 2007 cerca de la localidad de Fuentes (Cuenca, España) en niveles del Cretácico Superior (Campaniense-Maastrichtiense) durante las obras de instalación de las vías del acceso ferroviario de alta velocidad Madrid-Levante. Hasta la fecha, el yacimiento ha proporcionado una abundante colección de macrofósiles bien preservados que incluye plantas, invertebrados (moluscos bivalvos y gasterópodos) y vertebrados (peces actinopterygios y teleósteos, anfibios, tortugas panpleurodiras y pancryptodiras, lagartos, crocodiliformes eusuquios, ornitópodos rhabdodóntidos, terópodos dromeosáuridos y saurópodos titanosau-rios). El yacimiento de Lo Hueco es un depósito con gran concentración de fósiles (Konzentrat-Lagerstätten) que constituyen una buena representación de algunos grupos de tetrápodos continentales de finales del Cretácico mal conocidos (figura 1), como es el caso de los saurópodos titanosau-rios o los cocodrilos alodaposúquidos (Ortega *et al.*, 2008, 2015).

Estado general de conservación de la colección paleontológica de Lo Hueco

Los restos fósiles de vertebrados de Lo Hueco presentan un buen estado de preservación pero a nivel de conservación son extremadamente frágiles. Una de las características que más afecta a su conservación son los distintos minerales que constituyen la matriz circundante y que rellena la porosidad original y las grietas de los fósiles. Los minerales más abundantes en la composición de esta matriz son:

- *Arcilla*: es la litología predominante en el yacimiento y constituye el elemento mayoritario en la matriz que rodea a gran parte de los ejemplares y en muchos casos está también presente en el relleno de sus cavidades. Algunos de los minerales de la arcilla presentes en el yacimiento son muy inestables frente a factores ambientales como la humedad.



Figura 1. Yacimiento de Lo Hueco: serie de vértebras caudales de un dinosaurio saurópodo en conexión en el momento de su excavación.

- *Yeso*: son frecuentes distintas formas cristalinas de yeso, que producen agujas, lentejas o depósitos superficiales. En la mayoría de los casos estos depósitos rompen la estructura histológica original de los fósiles y, ocasionalmente, alteran las superficies hasta su desaparición. Los minerales de yeso son inestables frente a la humedad.
- *Hierro*: los óxidos de hierro pueden afectar a los fósiles, otorgándoles una tinción rojiza, y distribuyéndose de forma muy desigual sobre su superficie, pero sin apenas afectar a su estructura. En otros casos, estos recubrimientos son de mayor grosor pudiendo alcanzar espesores de varios milímetros que rodean a los ejemplares. El caso extremo, pero no menos abundante, es la penetración del hierro en el interior de los

huesos, dañando su estructura interna y externa. Las costras exteriores de hierro impiden el acceso al ejemplar, tanto para su tratamiento como para su estudio (Marcos-Fernández y Ortega, 2016).

Los óxidos de hierro no son estables frente a la humedad, y por su diferente absorción y distinto coeficiente de dilatación generan problemas en los fósiles que no tienen un relleno homogéneo de sus cavidades. En estas condiciones se puede activar una serie de microfracturas entre el cuerpo del espécimen y su superficie embebida en el óxido, que en ocasiones provocan el deterioro o la desaparición de las capas del fósil que representan al periostio superficial del hueso original (Marcos-Fernández *et al.*, 2011).

Los condicionantes de preservación y conservación provocan que los materiales del yacimiento de Lo Hueco sean muy inestables a las variaciones de humedad y que la aplicación de algunos tratamientos de preparación-restauración de uso habitual resulten un problema y un agente de riesgo en cuanto a su conservación (figura 2).

Atendiendo a esta situación, desde la finalización de la excavación en 2008 se han realizado distintos proyectos de investigaciones dirigidos a la adecuación de los protocolos de actuación (Marcos-Fernández *et al.*, 2013) que se amplían en el presente artículo.

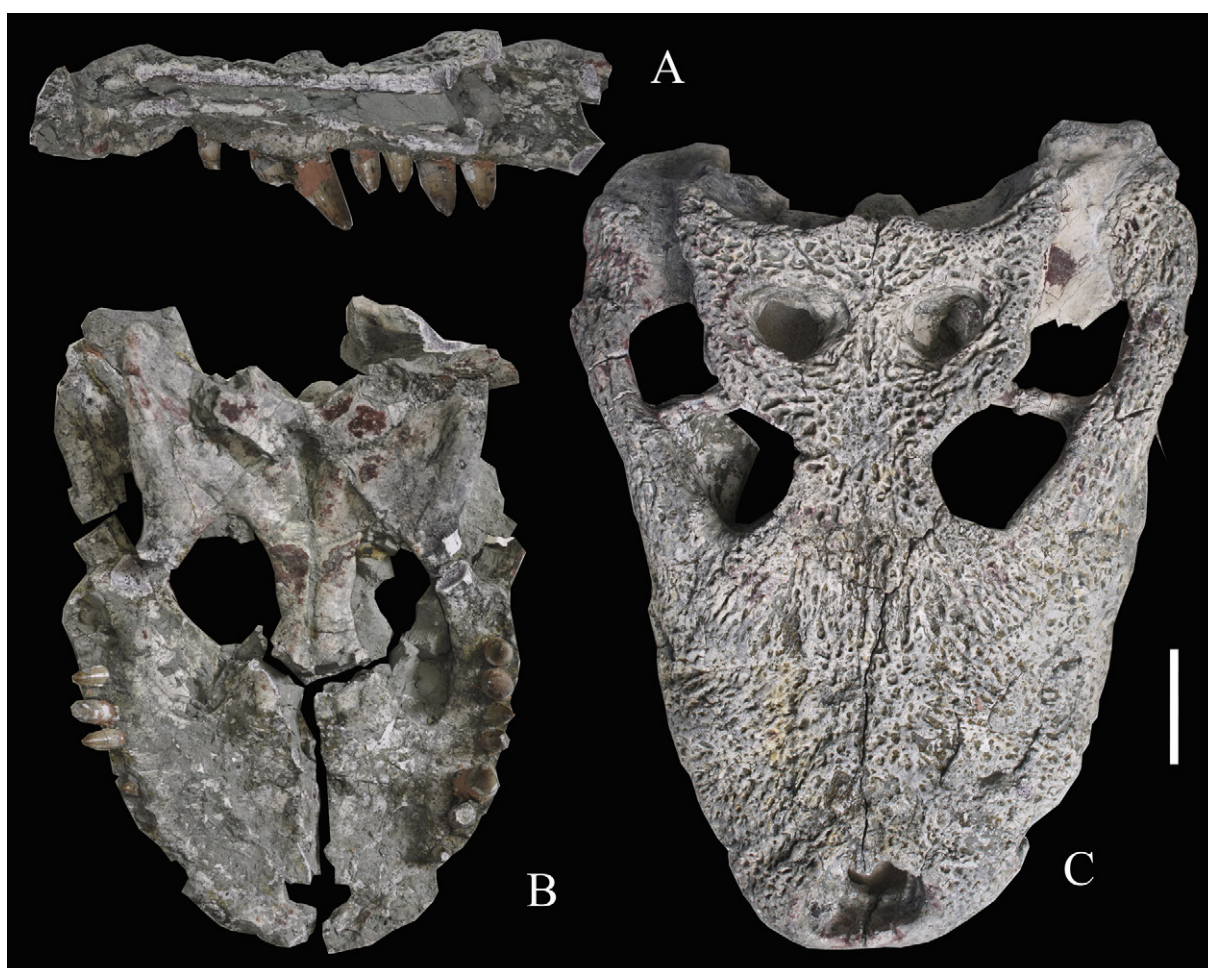


Figura 2. Cráneo del holotipo de *Lohuecosuchus* durante su preparación. Interior del cráneo que se encuentra relleno de arcilla (A). Cráneo fragmentado al activarse las fracturas en un ambiente de saturación de acetona (B). El holotipo una vez preparado y estable (C).

Objetivos

El objetivo de este estudio es realizar una propuesta de innovación tecnológica en los procesos de preparación paleontológica mediante la evaluación de la eficacia de distintos tratamientos de limpieza láser y química, con disoluciones gelificadas, sobre fósiles de Lo Hueco. Estos fósiles presentan costras superficiales de minerales de hierro o, en menor medida, de otra naturaleza que ocasionalmente impiden el acceso a la superficie de los ejemplares y, por lo tanto, no son abordables de forma satisfactoria mediante los tratamientos tradicionales. Esta situación afecta a la conservación de los fósiles e impide su estudio.

Metodología

Los ensayos se han realizado sobre fragmentos originales de bajo valor informativo y patrimonial, seleccionados por las características de las alteraciones que presentan y que resultan representativos de restos fósiles de interés de la colección de Lo Hueco.

Se considera que el tratamiento con láser proporciona una limpieza superficial de tipo físico (fotoablación) que puede resultar eficaz y controlable. Las características de los tres equipos láser utilizados se recogen en la tabla 1. El láser CL20 emite pulsos a altas frecuencias (40-100 KHz) que se distribuyen a lo largo de un ancho determinado (0,125-80 mm) generando al interaccionar con el material una línea de luz que permite barrer la superficie. Es un equipo con un gran potencial, por su versatilidad y velocidad de trabajo, pero debido a su mayor número de variables y posibilidades resulta más difícil establecer las condiciones óptimas. El láser Thunder Art tiene la ventaja de que emite en la misma longitud de onda fundamental que los otros equipos (1064 nm, infrarrojo cercano), pero además es capaz de generar su segundo (532 nm, verde) y tercer armónico (355 nm, ultravioleta). EOS 1000LQS es un equipo básico de fácil manejo y control.

Tabla 1
Características técnicas y parámetros de trabajo de los equipos láser utilizados

Modelo láser	Distancia focal (cm)	Diámetro spot (mm)	Longitud de onda (nm)	Frecuencia disparo (Hz)	Fluencia (mJ/cm ² o J/cm ²)	Duración pulso (ns o μs)
Thunder Art	100	10	1064	1-20	70-1115 mJ/cm ²	8 ns
			532		10-640 mJ/cm ²	
			355		5-370 mJ/cm ²	
EOS 1000 LQS	20 (aprox.)	1,5-6	1064	1-20	0,5-21,5J/cm ²	60-120 μs
CL 20 Backpack	23 (aprox.)	0,125	1062 (+/-2)	40-100KHz*	0,1-4,1J/cm ²	100 ns

* En este equipo la frecuencia de disparo (pulso) está relacionada con la energía por pulso, a mayor frecuencia menor energía por pulso. Además, consta de otros dos parámetros adicionales que también influyen en la energía real depositada por unidad de superficie (en consecuencia, la fluencia final es superior a la indicada), que son:

- Frecuencia de barrido (Hz): 30-180. Relacionado con la rapidez con la que los pulsos son dirigidos de un extremo al otro de la línea (alta, pulsos separados; baja, pulsos solapados).
- Ancho de línea (mm): 0,125-80 (dependiente de la frecuencia de barrido). Ancho de la línea luminosa entre el tamaño del spot y el máximo ancho de línea (80 mm).

Por otra parte, la aplicación de geles acuosos no se utiliza de forma general sobre vertebrados fósiles y no existe literatura disponible al respecto. La ventaja del método consiste en que permite su uso puntual en zonas concretas de la superficie de la pieza, controlando el aporte de humedad y de los agentes químicos aplicados. Hemos utilizado disoluciones acuosas, entre las que se incluyen formulaciones próximas a alguna de las utilizadas tradicionalmente en paleontología para la eliminación de concreciones ferruginosas (Howie, 1974), gelificadas con hidroxipropilcelulosa (Klucel G, CTS s.l.), ácido poliacrílico neutralizado (Carbogel, CTS s.l.) o polisacáridos como el agar-agar.

Soluciones con un fuerte carácter ácido (tioglicólico u oxálico, pH <1-2, gelificadas pH 1-4) en los límites de estabilidad de los gelificantes. Los ácidos han sido elegidos por ser de uso habitual en restauración paleontológica o por sus efectos disolventes en otras disciplinas de conservación-restauración. Algunas formulaciones contienen determinadas sales (hidrogenofosfato de calcio di-hidrato o hexametáfosfato de sodio) para reducir la agresividad del ácido frente al hueso, como agente limpiante y para neutralizar o tamponar la solución (*buffer*). En las mezclas se han seleccionado sus componentes y proporciones para obtener una serie de productos estables aptos para su aplicación. También se han hecho pruebas con la goma de Gelano (Gelzan TM CM, SIGMA-ALDRICH ®) y con agua oxigenada diluida (2-5 %).

Para la caracterización del soporte y de las concreciones a eliminar, así como para la evaluación de los tratamientos aplicados, hemos utilizado la siguiente relación de técnicas e instrumental analítico: examen visual de las muestras documentado fotográficamente; microscopio óptico estereoscópico (MO) Nikon SMZ1500, observaciones con luz blanca polarizada y luz ultravioleta (UUV); microscopio electrónico de barrido a presión variable Hitachi S-3400N acoplado a un sistema de microanálisis mediante espectrometría de energías dispersivas de rayos X Bruker-Quantax X Flash (VPSEM-EDX), imágenes de contraste composicional tomadas con electrones retrodispersados (BSE); identificación de fases cristalinas mediante difracción de rayos X (DRX), difractor de polvo policristalino Siemens D5000; medidas de rugosidad y variaciones de cota superficial, perfilómetro óptico TRACEiT innowep; medidas de reflectancia, espectrofotómetro de fibra óptica-Ocean Optics USB2000+ UV-VIS-NIR.

Resultados

En primer lugar abordaremos la caracterización de los materiales implicados y su estado de conservación (fragmentos de saurópodo y sus concreciones, figura 3). Seguidamente describiremos los ensayos realizados junto con la caracterización y evaluación de los tratamientos de limpieza aplicados: láser, láser-gel y geles.

La secuencia tipo de materiales del exterior al interior de los ejemplares es: arcillas color gris verdoso, costra ferruginosa rojizo-amarillenta y hueso fósil, pudiendo existir ausencias o intercalaciones entre estos niveles. La capa más superficial de arcillas y yesos (principalmente cristales grandes, mm o cm), tiene un espesor de milímetros a unos pocos centímetros. Está compuesta mayoritariamente por cuarzo, con presencia también de minerales de la arcilla (illita-caolinita) y pequeñas cantidades de calcita. En las muestras analizadas (DRX, VPSEM-EDX) no se han detectado minerales de la arcilla de carácter expansivo (esmeclitas y/o cloritas hinchables). Aunque es un hecho constatado, como recoge la bibliografía existente (Coruña Llopis *et al.*, 2011), que esta tipología de minerales está presente en los materiales arcillosos del yacimiento. Su presencia significativa en la superficie, y más aún en el interior del hueso, supone uno de los mayores riesgos para la conservación del material paleontológico extraído. Por esta razón son motivo de otros estudios específicos y, por ello, conviene prestar especial



Figura 3. Izquierda: fragmento de saurópodo recubierto de arcillas (concreción más externa). Derecha: costra ferruginosa que aflora en el fragmento anterior una vez eliminadas las arcillas.

atención a las actuales condiciones ambientales de almacenamiento o exposición, así como a cualquier tratamiento de limpieza o consolidación siendo desaconsejable todo aporte de humedad descontrolado.

La costra ferruginosa de espesor milimétrico (figura 4) consta de dos niveles diferenciados. El más superficial es de color rojizo, con una matriz de hematites principalmente que también contiene ilmenita, oxihidróxidos de hierro y minerales de la arcilla (illitas), con granos de: cuarzo (mayoritarios), feldespato potásico, moscovita y calcita, de tamaño de decenas a cientos de micrones. Por el contrario, el nivel más interno es de color pardo-amarillento, con una matriz de goethita (con pequeñas proporciones de hematites y minerales arcillosos) y con granos de composición y tamaño similar a los descritos en el nivel anterior (también de rutilo). Además de estos estratos, podemos encontrar acumulaciones de arcillas de color rojo intenso en fracturas, concavidades o depresiones. Su análisis (VPSEM-EDX) indica que poseen una composición muy similar a las arcillas gris verdosas comentadas anteriormente, en este caso con un mayor contenido en óxidos de hierro, aunque a simple vista o a la lupa puedan parecer concreciones ferruginosas.

En el interior de cualquiera de estas capas pueden encontrarse de forma ocasional microfragmentos de hueso. Esto siempre se ha observado cuando la zona más superficial del fósil no se corresponde con la superficie original del hueso (periostio), ya que esta no se ha conservado. La composición del hueso es hidroxiapatito (mayoritario) y apatito; además, rellenando su porosidad (canales de Havers, bordes de las osteonas, grietas...) podemos encontrar minerales de la arcilla, yeso, cuarzo, calcita o los óxidos u oxihidróxidos de hierro mencionados, de tal forma que un tratamiento que movilizase cualquiera de ellos podría comprometer la estabilidad del hueso y producir la pérdida de material óseo.

A modo de conclusión de este apartado, conviene recalcar que los procesos geológicos de compresión litostática y circulación de fluidos freáticos a lo largo de millones de años (Barroso-Barcenilla *et al.*, 2010) son la causa principal del estado que presenta actualmente cada una de las muestras estudiadas. La estructura ósea original, a causa de las tensiones mecánicas y la precipitación o deposición mineral a la que se ha visto sometida, se ha deforma-

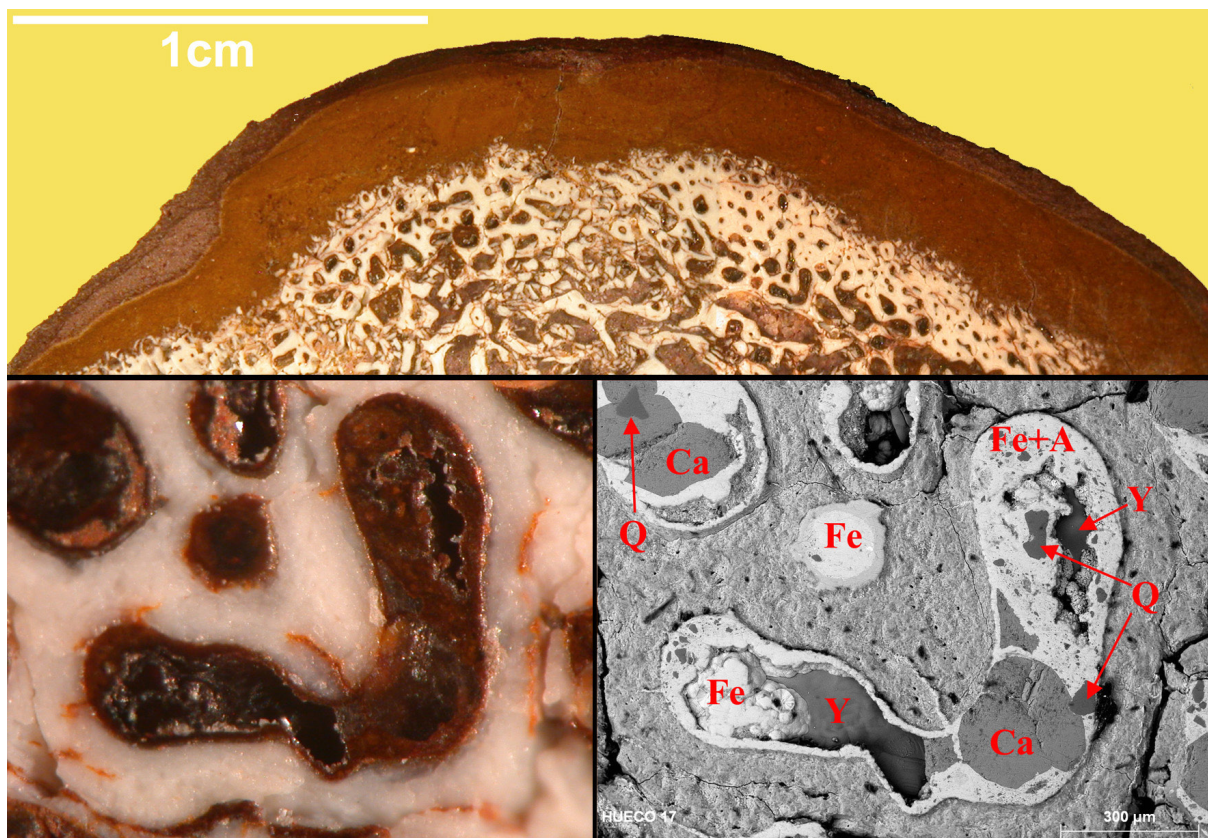


Figura 4. Arriba, imagen MO de la sección pulida de una muestra del fragmento fósil de la figura anterior (imagen derecha), donde se observa su estructura interna en capas. La capa más superficial es de color rojizo, matriz de hematites con granos minerales. El siguiente nivel más interno de la concreción ferruginosa es de color pardo-amarillento, matriz de goethita con granos minerales. Por último, está el hueso de color blanco con sus poros y grietas rellenos de minerales. Abajo, imágenes MO (color) y BSE-VPSEM (blanco y negro), detalle del relleno de la porosidad del hueso con minerales de la arcilla (A), de hierro (Fe), yeso (Y), calcita (Ca) y cuarzo (Q).

do, fracturado y mineralizado. Mineralizaciones que en función de su composición y del lugar de ubicación del espécimen, podrían ser el mayor riesgo para su conservación por ser sensibles a las variaciones ambientales (humedad y temperatura) experimentando cambios de volumen y generando tensiones en el material. Además, dado su grado de microfracturación interna y su interpenetración con las concreciones superficiales presentes, cabe señalar la fragilidad mecánica que se les presupone ante cualquier actuación o intervención.

Antes de iniciar los tratamientos láser, se han realizado medidas de reflectancia de las distintas superficies a tratar para evaluar su absorción óptica en las distintas longitudes de onda. Medidas en la superficie de la costra ferruginosa roja y amarilla, superficie del hueso limpia y superficie e interior del hueso con restos de minerales de hierro (figura 5). Las medidas se han realizado tanto en seco como en húmedo (humedeciendo con agua la superficie del material). En todos los casos, para las tres longitudes de onda de interés (1064/532/355nm) los resultados han sido favorables, ya que la superficie del hueso siempre ha sido más reflectante que la costra. Destacar de los datos obtenidos en la costra roja, tanto en seco como en húmedo, que esta tiene en los 532 nm (verde) una zona de alta absorción mientras que el hueso blanco tiene una alta reflectancia.

Todos los tratamientos láser se han realizado sobre costra ferruginosa, realizando catas de 4 cm² con diferentes condiciones de trabajo. Con los equipos Thunder Art y EOS 100LQS

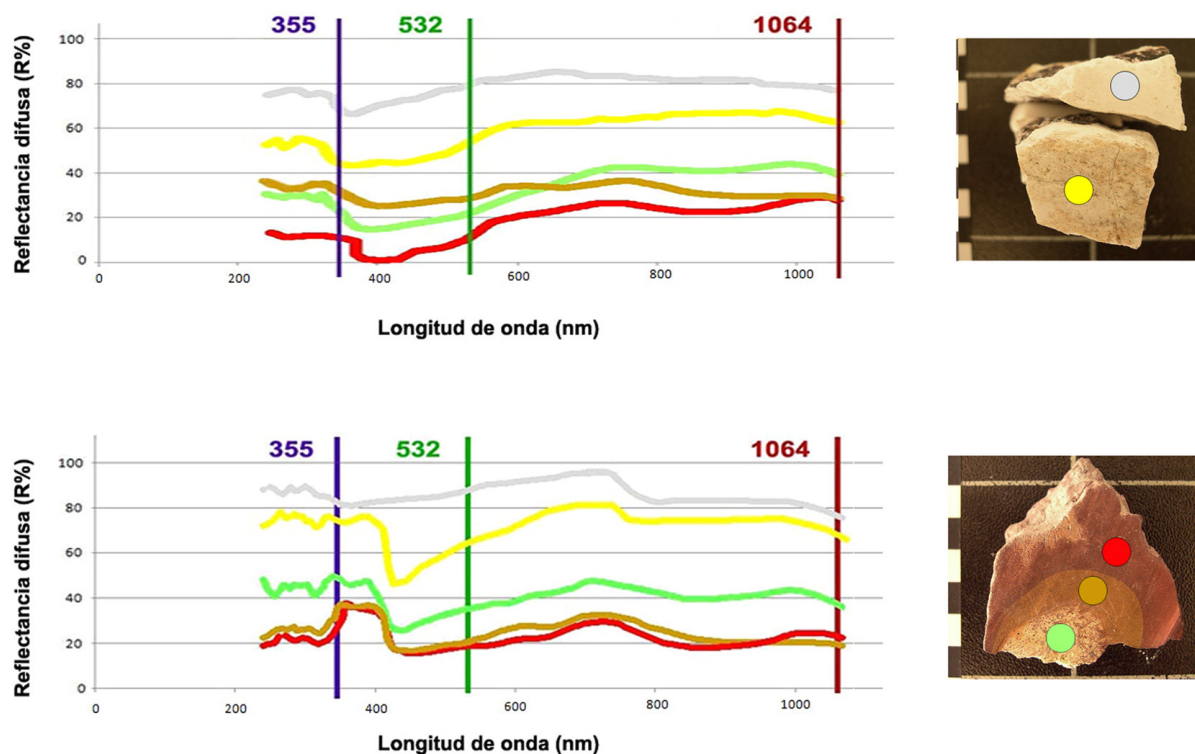


Figura 5. Fragmentos fósil sobre los que se han realizado las medidas de reflectancia (segmento escala: 5 mm): costra ferruginosa roja y amarilla, superficie del hueso limpia, superficie del hueso y hueso interno con restos de minerales de hierro. Las medidas se han realizado tanto en seco (gráfico inferior) como en húmedo (gráfico superior).

se ha podido comprobar que con la radiación verde o infrarroja y fluencias por pulso del orden de 1 J/cm^2 (0,5-1,4; 0,6 para el verde) y frecuencias de disparo de 5 Hz (20 Hz para el verde), el color rojizo de la costra se vuelve negro cuando se realizan por toda la superficie de la cata uno o varios barridos láser (2-10, en función de las condiciones de trabajo). Textualmente esto supone la fusión superficial de la costra generando un vitrificado muy poroso y craquelado de espesor micrométrico. Esta transformación facilita su posterior eliminación mecánica con el mango de madera de un hisopo, ya que la costra se vuelve menos dura y coherente que la costra inicial sin tratar. En la capa inferior amarilla-parda (goethita), por debajo del vitrificado negruzco se vuelve rojiza (hematites) por el efecto térmico del láser que induce la deshidratación de los oxihidróxidos de hierro (Hajpál *et al.*, 2004). En todos los casos queda patente el predominio del efecto de la fusión láser frente a la ablación (arranque de material) y la necesidad de recurrir a otro método mecánico para eliminar el vitrificado que se produce. El proceso siempre se inicia humectando la superficie, seguido de 1-10 barridos láser y retirada del material. Repitiendo esta secuencia, se necesita una hora para producir en una cata rebajes de la costra entre 0,5 mm y 6 mm en función de su composición, el equipo y las condiciones de trabajo (en torno a 6 mm en las arcillas rojas).

En un tratamiento con el equipo EOS 1000LQS de un barrido láser y retirada de material (figura 6), el rebaje es del orden de decenas de micrones (30-70 μm). En otro tratamiento con el láser Thunder Art de diez barridos y retirada de material, cuando aflora el hueso y continúa el tratamiento 30 repeticiones más, se observa a simple vista que se daña su superficie (pérdida de material).

Se ha calculado el umbral de daño de la superficie del hueso humectada para el láser EOS 1000 LQS con una fluencia por pulso próxima a 1 J/cm^2 y una frecuencia de 5 Hz. Dis-

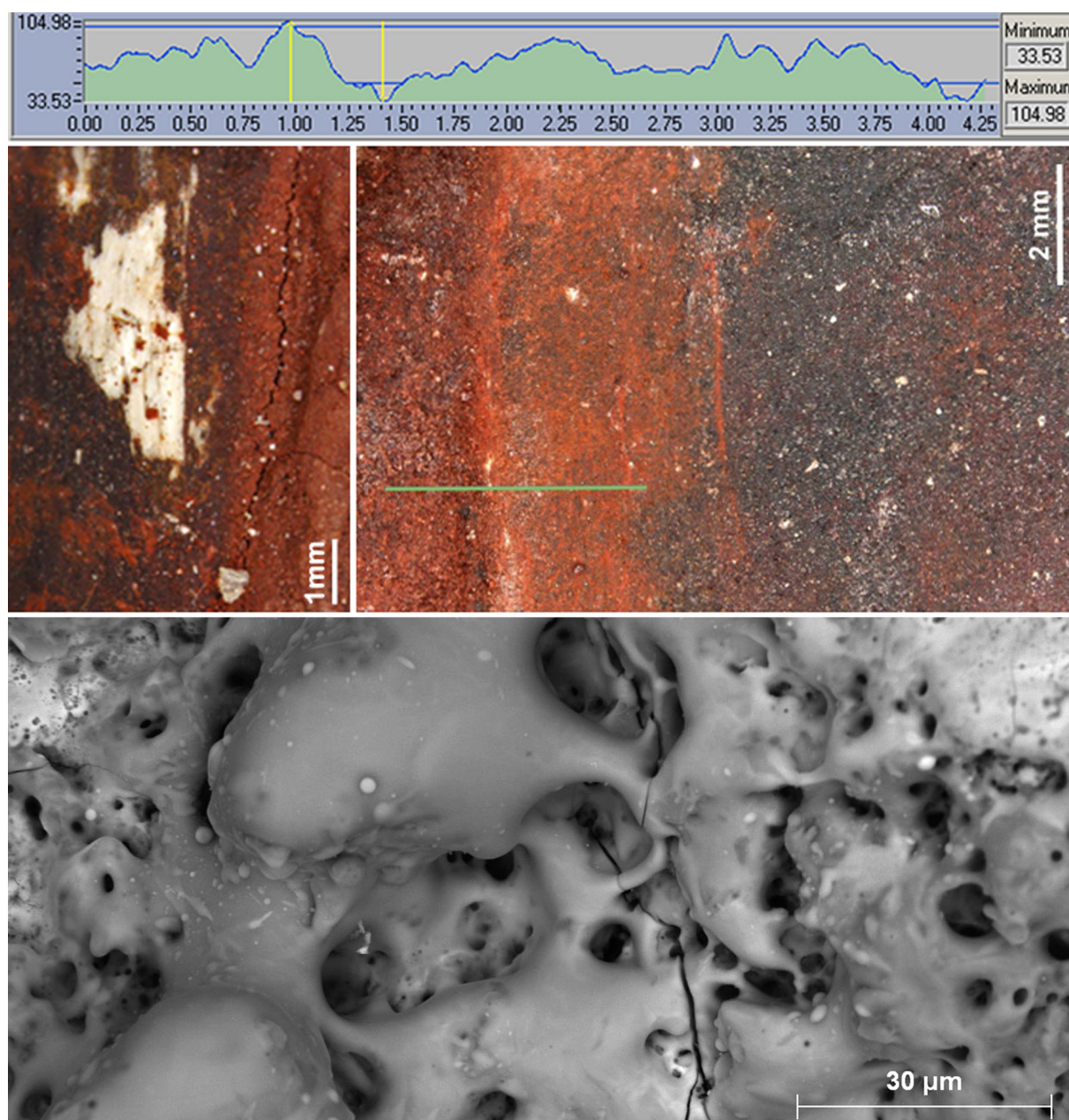


Figura 6. Arriba, medida TRACEiT, perfil topográfico de la superficie medido sobre la recta verde (4,25 mm) de la imagen inferior derecha. Las líneas amarillas marcan las cotas máxima y mínima, valores en micrones en el margen (eje de ordenadas). Centro, imágenes MO: izquierda, extremo de una cata con el láser Thunder Art donde aflora la superficie del hueso; derecha, cata con el láser EOS 1000 LQS, contacto entre la zona no tratada (izquierda), la zona tratada una vez retirada mecánicamente la costra fundida y la costra fundida. Abajo, imagen BSE-VPSEM, fusión superficial de la costra generando un vitrificado muy poroso y craquelado de espesor micrométrico.

parando durante uno (cinco pulsos) y dos (diez pulsos) segundos respectivamente en dos zonas concretas de hueso. En las observaciones *de visu* y MO, el análisis de los resultados obtenidos nos indica que ninguna de las zonas tratadas presenta diferencias sustanciales con respecto a la zona sin tratar (siendo esta más oscura). Sin embargo, en las imágenes de microscopía electrónica observamos que en el área tratada con 10 disparos existen zonas en las que se ha modificado la textura superficial del hueso, zonas en las que se aprecia un pulido de la superficie con disminución de su rugosidad (figura 7).

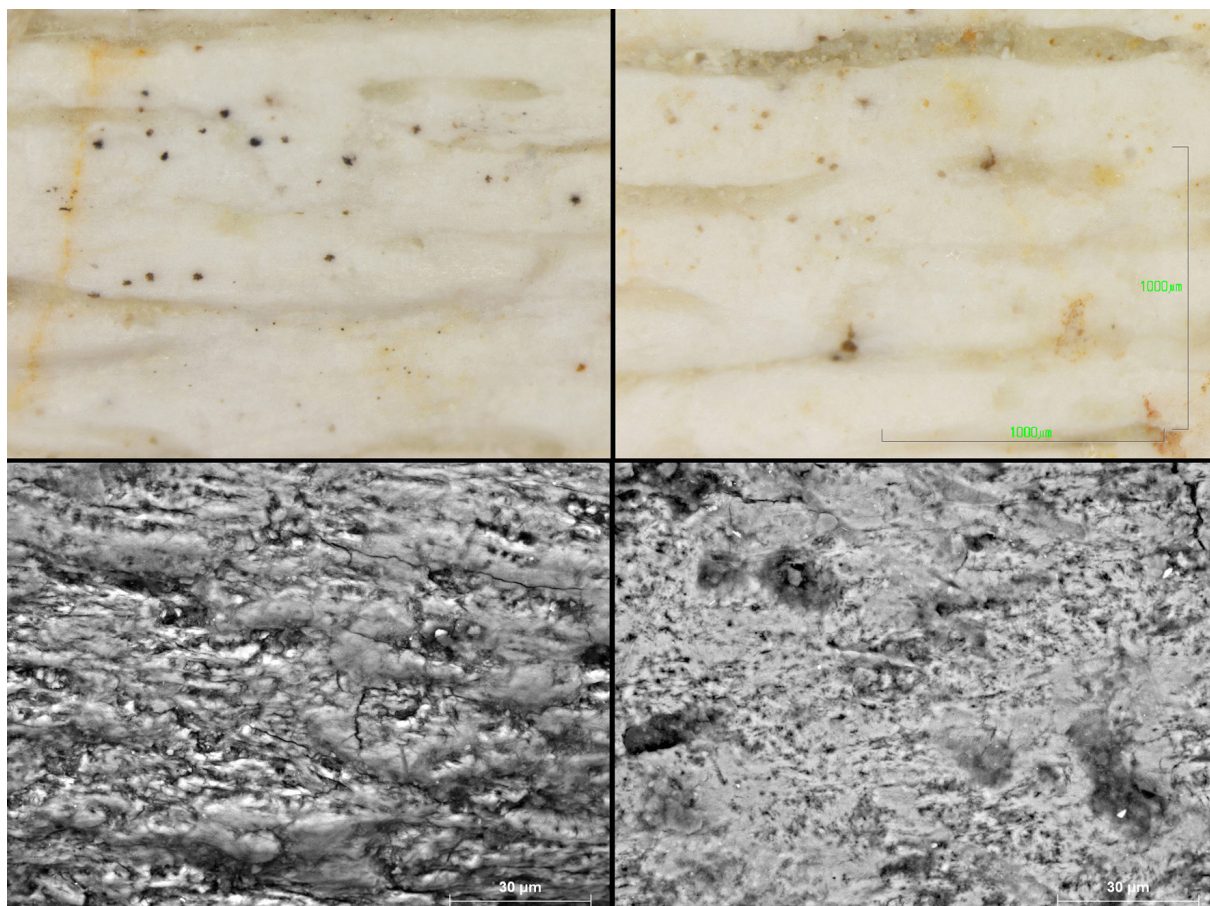


Figura 7. Cálculo de los umbrales de daño de la superficie del hueso humectada para las condiciones de trabajo con el láser EOS 1000 LQS, fluencia de pulso 1 J/cm^2 . De izquierda a derecha, zona de muestra no tratada y zona tratada dos segundos (10 disparos). Imágenes MO: los puntos negros de la zona no tratada (concentraciones de óxidos de hierro) se aclaran en las zonas tratadas (aspecto anaranjado). Imágenes BSE-VPSEM: en la zona tratada se aprecia un cierto pulido de la muestra con aplanamiento de la superficie y disminución de la rugosidad.

En las catas con el láser CL 20 Backpack los resultados no fueron los esperados para estas condiciones de trabajo: fluencia por pulso $1,3 \text{ J/cm}^2$; frecuencia de disparo 63 KHz; frecuencia de barrido 118 Hz y ancho de línea 31 mm. El umbral de ablación de la costra ferruginosa supera el umbral de daño del hueso como se puede observar en las imágenes al microscopio óptico y electrónico (figura 8). Los efectos son más severos que con los otros dos equipos tanto en la superficie del hueso como sobre la costra de hierro (véanse los surcos dejados por el haz láser). Las observaciones del hueso con VPSEM muestran que el tratamiento produjo el arranque de microfragmentos, microfracturación superficial o fusión y vitrificación en puntos donde se hallan concreciones arcillosas superficiales. A simple vista se aprecian cambios en su rugosidad y color superficial, con zonas donde predomina el arranque de material y zonas donde lo hace la fusión (color amarillento). En general, en el hueso dominan los procesos de ablación frente a la fusión, y en el caso de la costra arcillo-ferruginosa sucede lo contrario.

Con este láser los valores de fluencia por pulso son relativos, ya que la cantidad de energía por unidad de superficie que se aplica sobre el material depende también de los parámetros frecuencia de barrido y ancho de línea de este equipo. Esto es importante a la hora de comparar estos valores, y sus efectos sobre la superficie del material, con los de los otros

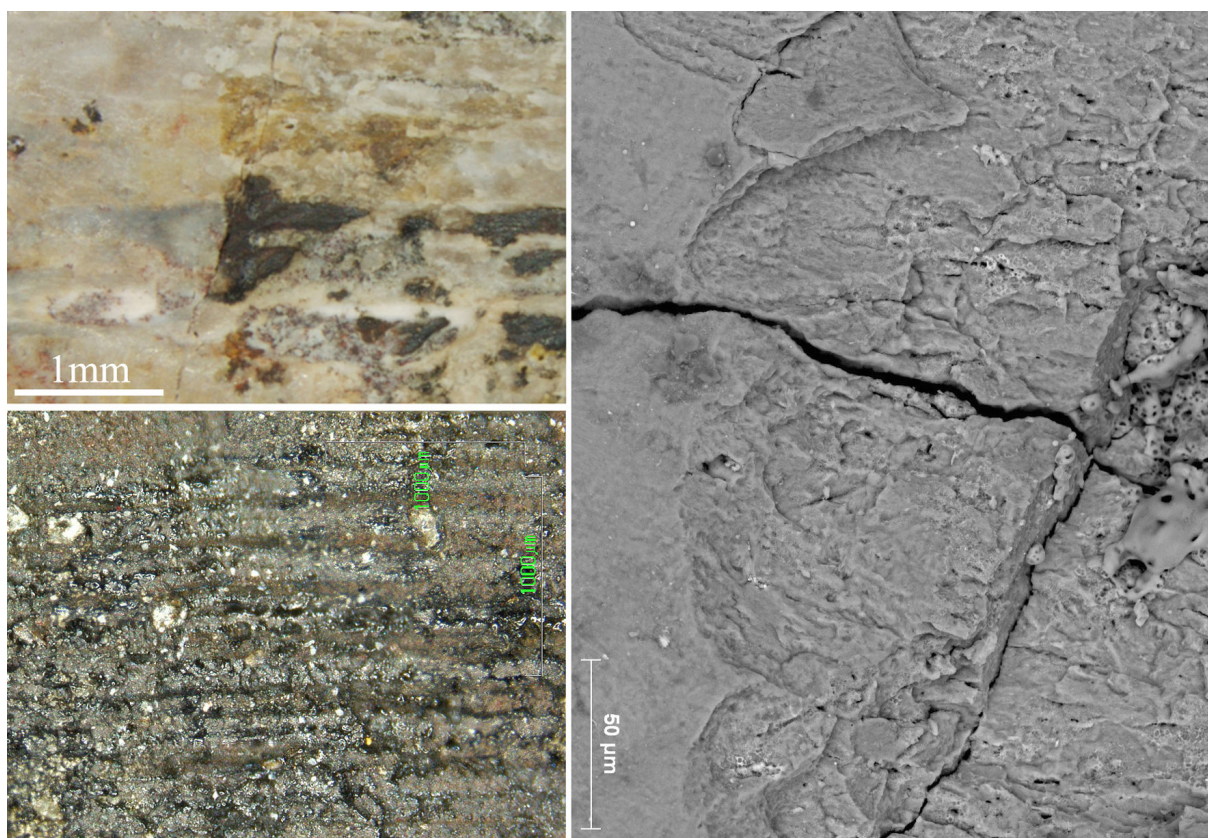


Figura 8. Izquierda, imágenes MO: arriba, contacto entre superficie de hueso no tratada y superficie tratada (centro-derecha de la imagen) con el láser CL 20 Backpack; abajo, costra ferruginosa tratada con el láser CL 20: véanse los surcos dejados por el haz láser en la superficie. Derecha, imagen BSE-VPSEM, contacto entre la zona tratada y sin tratar (margen izquierdo) del hueso: se observa el arranque de microfragmentos, microfracturación superficial, su fusión y vitrificación en puntos donde se hallan concreciones arcillosas superficiales.

dos equipos (Thunder Art y EOS 1000 IQS). En este equipo obtener condiciones óptimas de trabajo exige una gran experiencia, aunque puede ofrecer una amplia gama de posibilidades que convendría explorar.

En este sentido, y tomando como referencia algunos trabajos recogidos en la bibliografía en los que se combina la limpieza láser con la limpieza mediante apósitos de agar-agar (Anzani *et al.*, 2010; Striova *et al.*, 2011), se han realizado pruebas de ablación láser con este equipo a través de los gelificantes seleccionados mezclados solo con agua destilada (agar-agar 4 %, Gelzan 2 %, Klucel G 8 % y mezcla Klucel G 4 %-Carbogel 4 %). Todas las pruebas se han realizado sobre costra ferruginosa barriendo la superficie cubierta por el gel. Las condiciones de trabajo han sido: fluencia por pulso $1,6 \text{ J/cm}^2$; frecuencia de disparo, 51 KHz; frecuencia de barrido, 105 Hz, y ancho de línea, 71 mm. Los resultados son aún preliminares, pero se ha observado que en todos los casos hay que controlar que el haz se focalice en la superficie del material y no en la del gel. Si la velocidad de barrido es muy baja, el gel se deshidrata y se torna opaco, pudiendo llegar a quemarse; si se aumenta la velocidad se rehidrata, recuperando su transparencia. En las zonas barridas por el haz láser se observa un aumento de burbujas y material eyectado por fotoablación en el interior del gel. Esto facilita su retirada cuando se vuelve rígido en el caso del agar y el Gelzan (figura 9).

A simple vista, el aspecto de la superficie no sufre grandes variaciones tras el tratamiento. En algunas zonas se insinúa la textura en surcos característica que produce el láser CL 20

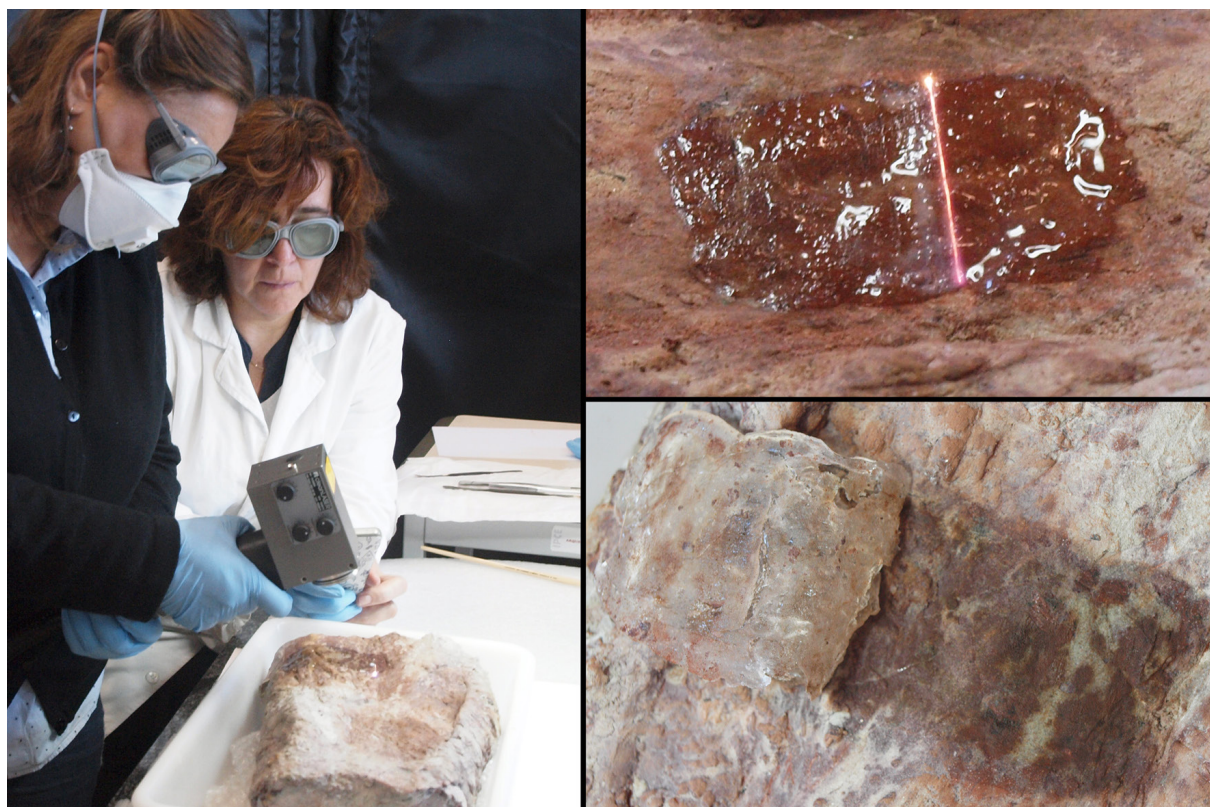


Figura 9. Imágenes del tratamiento combinado láser-gel, láser CL 20 y apósito de agar (arriba derecha) o Gelzan (abajo derecha). Espesor capa gel, 2-5 mm.

Backpack y puntualmente se origina un ligero oscurecimiento de la costra ferruginosa, que no tiene nada que ver con el aspecto vitrificado negro de las superficies solo tratadas con este láser. De esta manera se potencia el efecto ablativo frente a la fusión, lo cual establece un punto de partida para posteriores trabajos.

Respecto a los tratamientos realizados con geles, podemos distinguir entre tratamientos de corta (15-30 minutos) y larga (cinco horas) duración. Dentro de los tratamientos de corta duración se encuentran los aplicados para la eliminación de las arcillas superficiales (figura 10). Para este propósito se han utilizado distintas formulaciones como la disolución al 5 % de agua oxigenada (porcentaje en volumen) gelificada con una mezcla al 50 % de Klucel G (4 %) y Carbogel (4 %), porcentajes en peso. Asimismo, se ha utilizado otro tratamiento que consiste en una aplicación secuencial de dos geles. El primero, preparado con una disolución de ácido oxálico (1-2 %) gelificada con agar-agar (4 %), seguido de otro gel también de agar (4 %) en este caso mezclado solo con agua destilada y aplicado una vez retirado el primero mecánicamente (todos los porcentajes en peso). El segundo gel al enfriarse se vuelve rígido facilitando así su retirada y favoreciendo con ella la eliminación de los residuos dejados por el primero. Son necesarias varias aplicaciones en ambos tratamientos para alcanzar la costra de hierro.

La preparación del gel agar-agua se realiza siguiendo los protocolos existentes en la bibliografía (Campani *et al.*, 2007; Anzani *et al.*, 2008; Tortajada *et al.*, 2013). La preparación del gel ácido agar-oxálico se realiza mezclando y calentando primero el gelificante con agua y añadiendo posteriormente a la mezcla, cuando se está enfriando y continúa líquida, el ácido disuelto en una proporción variable del agua destilada utilizada (1/8-1/4 en función de la cantidad de ácido oxálico).

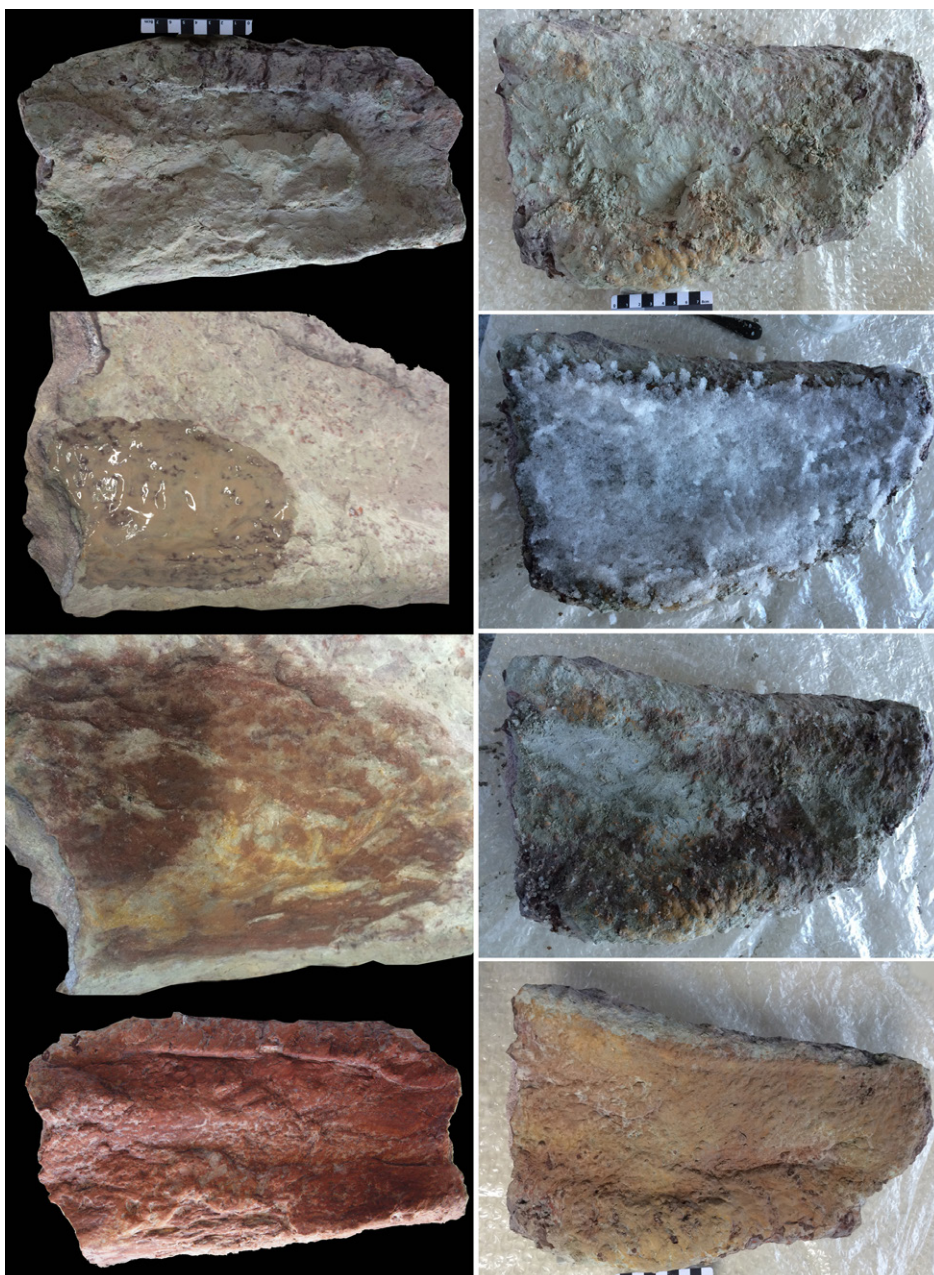


Figura 10. Tratamientos sobre fragmento de fémur de saurópodo para la eliminación de arcillas. De arriba a abajo: izquierda, tratamiento secuencial agar-oxálico/agar-agua; derecha, apósitos de agua oxigenada (aprox. 5 %) gelificados con mezclas al 50 % de Carbogel y Kluacel G. Varias aplicaciones en ambos tratamientos hasta alcanzar la costra de hierro.

En la costra ferruginosa también se han aplicado y caracterizado más exhaustivamente los tratamientos secuenciales de corta duración agar-oxálico/agar-agua. En este caso se han utilizado distintas concentraciones de ácido (0,2-2 %) pudiendo añadirse, o no, cantidades similares de hexametáfosfato de sodio a la mezcla. En todos los casos el gel actúa sobre la superficie de la costra, pero su pH próximo a uno es demasiado ácido para que el gel sea estable y se vuelva, al enfriarse, tan rígido como cuando es formulado solo con agua. En cualquier tipo de aplicación, como líquido viscoso (caliente o tibio) o rígido en forma de pastilla (frío), con o sin interfase de papel tisú, quedan restos de gel tapizando la superficie que no se eliminan totalmente con la segunda aplicación de agar-agua (figura 11). Además, puede produ-

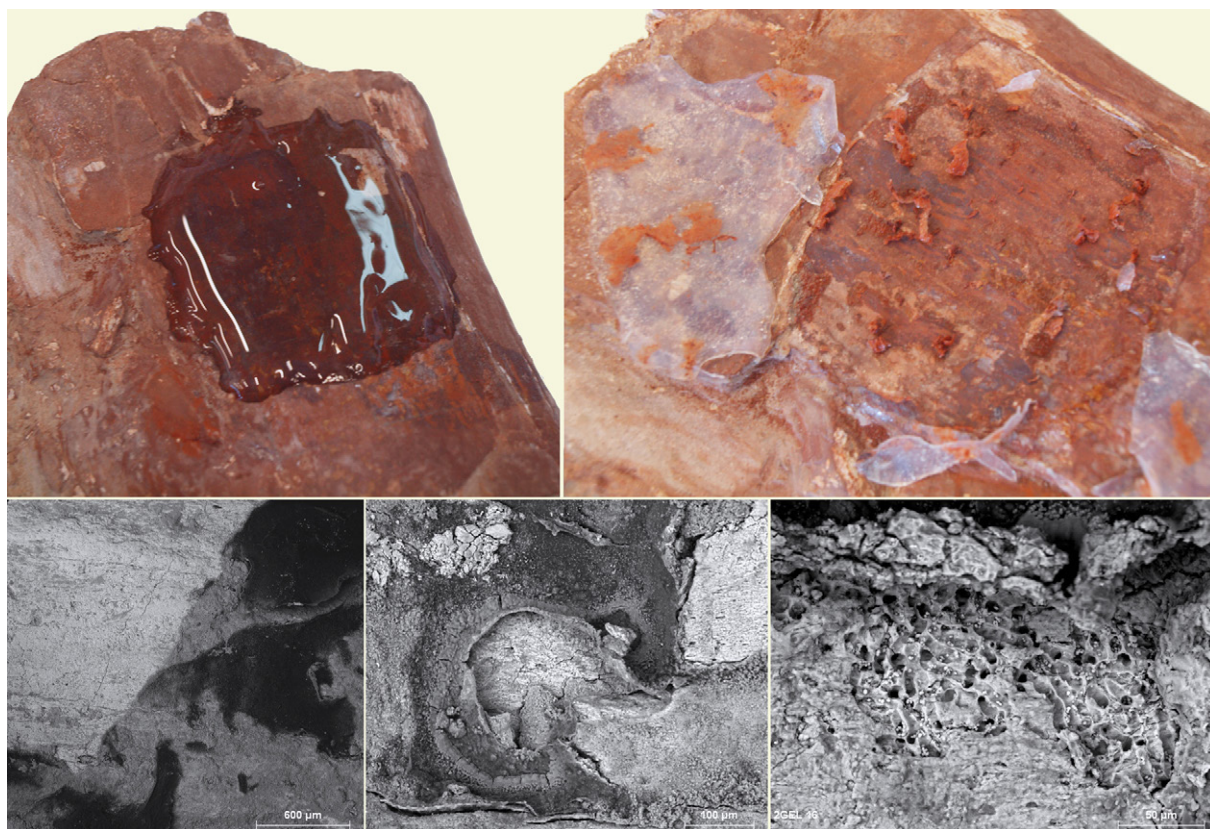


Figura 11. Imágenes del tratamiento agar-oxálico sobre costra ferruginosa. Abajo, imágenes BSE-VPSEM: izquierda, veladuras (color gris) y restos (negro) de gel; centro, aureola de oxalatos cálcicos; derecha, disolución del hueso..

cirse la precipitación de sales (oxalatos cálcicos) o la disolución puntual del hueso en zonas donde este aflora (observable al VPSEM).

Tomando como referencia formulaciones existentes en la bibliografía (Lee Scott, 2012), se han gelificado con agar-agar (4 % en peso) disoluciones de peróxido de hidrógeno (2-3 % en volumen). Los resultados son más prometedores: se consigue un gel que actúa levemente sobre la superficie de la costra y que se vuelve rígido al enfriarse facilitando su retirada y minimizándose la presencia de restos. En futuros estudios, habrá que estudiar su efecto con mayores concentraciones de peróxido y en ejemplares con presencia de arcillas expansivas.

Con los gelificantes Klucel G y Carbogel, además de tratamientos de corta duración, se han realizado aplicaciones de larga duración (cinco horas) sobre la costra ferruginosa (figura 12). Se han gelificado disoluciones de ácido oxálico (1-5 %), solo o combinado con hexametafosfato de sodio (en ambos casos sigue habiendo presencia de sales) o de ácido tioglicólico. El resultado más relevante consiste en haber gelificado una formulación basada en la propuesta por Howie (1974) utilizada tradicionalmente en paleontología para la eliminación de concreciones ferruginosas por inmersión, restringiendo de esta manera el aporte de humedad solo a la superficie y de forma controlada.

Esta disolución se prepara añadiendo a 100 ml de agua destilada 5 ml del ácido tioglicólico al 80 %. Se mezcla en agitador magnético y se añade un gramo de calcio hidrogenofos-

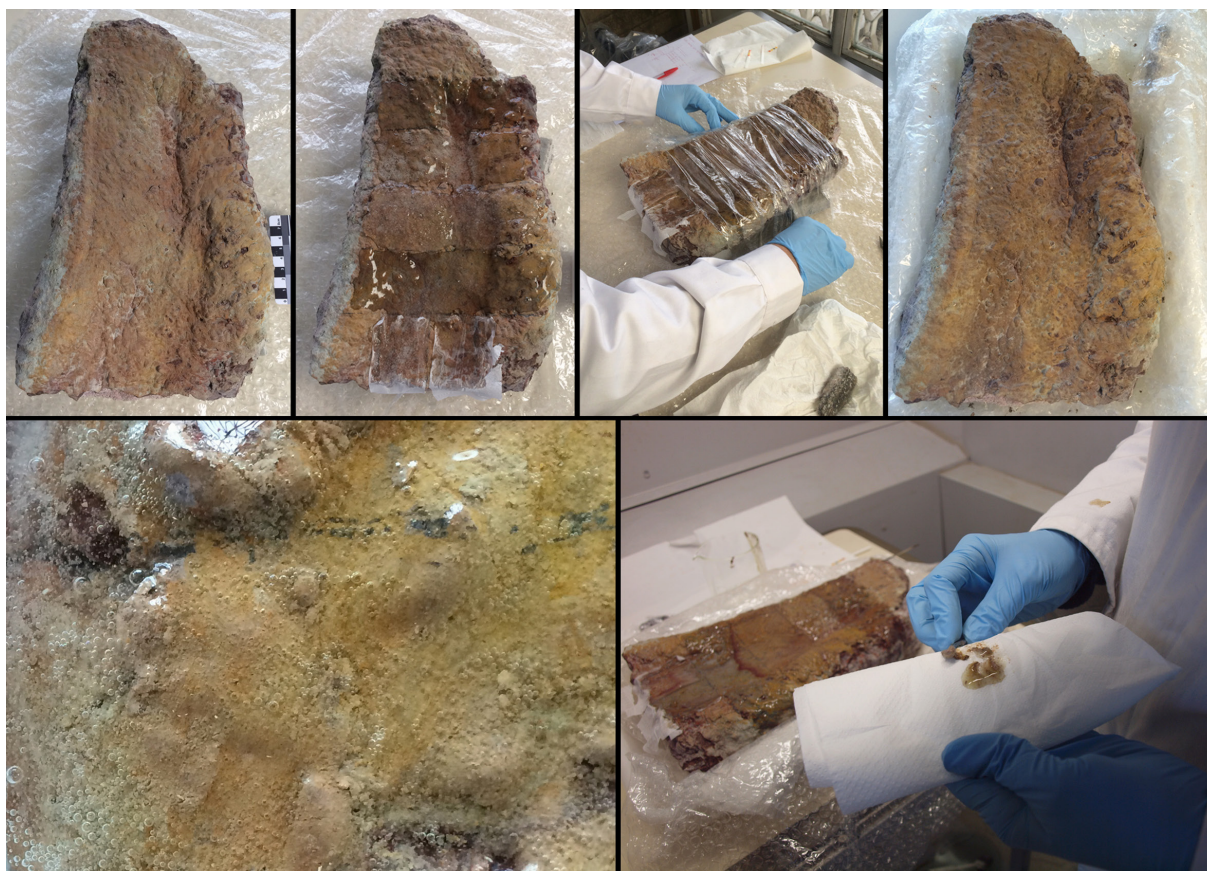


Figura 12. Tratamientos de larga duración (5 h) sobre costra ferruginosa con los geles Klucel G y Carbogel, gelificando disoluciones ácidas de ácido oxálico o tioglicólico (Howie, 1974). Arriba, de izquierda a derecha, después de la retirada de los depósitos arcillosos superficiales; recién aplicados los geles a prueba; cubiertas las catas con film plástico; aspecto del fragmento fósil una vez retirados los geles. Abajo: izquierda, remoción del hierro en el gel de tioglicólico, se observa transcurrida una hora y a las 2 h con mayor claridad; derecha, retirada con espátula de los geles aplicados.

fato di-hidrato. Para facilitar su disolución se calienta la solución hasta los 40 °C. Se añade posteriormente, mientras se enfría la solución en agitación, el gelificante en polvo: 4 u 8 g de Klucel G o una mezcla de 3 g de Carbogel más 6 g de Klucel G. Los geles se agitan hasta lograr su homogenización. Todas estas operaciones se realizan en cabina con extracción de aire y con las protecciones personales necesarias para tal propósito.

Las catas realizadas con estos tratamientos permanecen cinco horas cubiertas con film plástico, realizándose medidas y observaciones periódicas para controlar su evolución (en Howie, pH inicial 3-4; final, 5). Con la retirada del gel se elimina muy poca cantidad de costra; por el contrario, se eliminan prácticamente todos los restos de otros depósitos superiores (arcillas, yeso o concreciones calcáreas). En todos los casos se observa un burbujeo en los geles y que el hierro aparece disuelto en su interior (se aprecia transcurrida una hora y a las dos horas con mayor claridad). Sigue existiendo un problema con los residuos de gel, incluso cuando se interpone una interfase de papel tisú, que se reduce en las mezclas de Klucel G y Carbogel. Los geles se eliminan mecánicamente con espátula y posteriormente se realiza una limpieza de la superficie con hisopo de algodón humedecido en una disolución de agua-etanol al 50 % para la retirada de los residuos dejados por el gel. Se propone continuar en esta línea de trabajo, por ejemplo, con la gelificación de la disolución de neutralización del tratamiento de Howie (disolución al 5 % de hidróxido de amonio).

Conclusiones

La elección de un tratamiento que resulte eficaz y viable para la intervención sobre algunos fósiles de dinosaurios de la colección de Lo Hueco resulta en ocasiones compleja. Se ha llevado a cabo una serie de ensayos dirigidos a la evaluación de soluciones alternativas para el tratamiento de las concreciones que presentan los ejemplares de Lo Hueco y que pueden extenderse a las que aparecen en otros yacimientos mesozoicos y cenozoicos de vertebrados.

Atendiendo a la similitud que presentan muchos fósiles con otros materiales líticos de interés patrimonial en los que ya se aplica este tipo de técnicas (arquitectura, escultura, arqueología), puede considerarse que tanto la limpieza con láser como la limpieza química con geles, o la combinación de ambas, son herramientas útiles y sostenibles en la conservación paleontológica una vez ajustadas sus condiciones de aplicación. Los resultados de este estudio determinan un punto de partida para posteriores trabajos.

Agradecimientos

A los compañeros del Grupo de Biología Evolutiva (UNED), de CROAPAE (Conservación y Restauración de Obras de Arte y Patrimonio Arqueológico y Etnográfico) y del Área de Investigación y formación del IPCE. También especialmente al doctor don Daniel Vázquez Moliní, catedrático de la Escuela de Óptica de la UCM, por su colaboración en las medidas de reflectancia realizadas para este trabajo. Por último, al Plan Nacional de Investigación en Conservación por la financiación de este proyecto (PNIC2014-001) y por la confianza depositada en este equipo de trabajo.

Bibliografía

- ANZANI, M., BERZIOLI, M., CAGNA, M. *et al.* (2008): «Use of Rigid Agar Gels for Cleaning plaster objects». *CESMAR*, 7, cuaderno 6. Saonara: Il Prato.
- ANZANI, M. *et al.* (2010): *Sperimentazione di pulitura Laser con intermediazione di gel di Agar*. Convegno Nazionale Aplar 3. Il Laser e I Laser. Atti del Convegno Applicazioni Laser nel Restauro, Bari.
- ASMUS, J. F. (2000): «Laser divestment for natural history museum collections». *Journal of Cultural Heritage*, 1, Supplement 1, pp. 259-262.
- BARROSO-BARCENILLA, F. *et al.* (2009): «New and exceptional discovery in the Upper Cretaceous of the Iberian Peninsula: the palaeontological site of “Lo Hueco”», Cuenca, Spain. *Cretaceous Research*, 30: 1268-1278.
- (2010): «Estudio preliminar sobre Geología y Tafonomía del yacimiento paleontológico de “Lo Hueco” (Cretácico Superior, Cuenca, España)». *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*. Sección geológica. Tomo 104, pp. 57-70.
- BRUNETTO, A. (2000): *L'utilizzo della strumentazione laser per la pulitura delle superfici nei manufatti artistici*. Edit: Il prato. ISBN: 88-87243-86-7.
- CAMPANI, E., CASOLI, A., CREMONESI, P. *et al.* (2007): «Use of Agarose and Agar for preparing “Rigid Gels”». *CESMAR*, 7, Cuaderno n.º 4. Saonara: Il Prato.

- CASTILLEJO, M. *et al.* (2008): *Lasers in the conservation of artworks*. Proceedings of the international conference LACONA VII. Madrid. Londres: Taylor & Francis Group.
- COOPER, M. (2005): *Introducción a la limpieza con láseres*. Madrid: ISTMO. ISBN: 9788470904172.
- CORUÑA LLOPIS, F., *et al.* (2011): *Clay Mineral characterization of «Lo Hueco» fossil site (Upper Cretaceous, Cuenca, Spain)*. European Clay Conference. Turkey.
- DEA, I. C. M. (1989): «Industrial polysaccharides». *Pure and Applied Chemistry*, v. 61, n.º 7, pp. 1315-1322.
- DIÉGUEZ, C. *et al.* (1994): *Manual de colecta, preparación y conservación de macrofósiles para colecciones científicas*. Manuales técnicos de Museología. Volumen 4. Museo Nacional de Ciencias Naturales. Consejo superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- FELDMANN, R. M.; CHAPMAN, R. E., y HANNIBAL, J. T. (eds.). (1989): *Paleotechniques*. The Paleontological Society Special Publication, 4.
- HAJPÁL, M., y TÖRÖK, Á. (2004): «Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat». *Environmental Geology*, 46: 311-322.
- HOWIE, F. M. P. (1974): «Introduction of thioglycolic acid in preparation of vertebrate fossils» [en línea]. *Curator The Museum Journal*, 17: 159-166.
- LANDUCCIA, F.; PINIB, R.; SIANOB, S.; SALIMBENIB, R., y PECCHIONIA, E. (2000): «Laser cleaning of fossil vertebrates: a preliminary report». *Journal of Cultural Heritage*, 1: 263-267.
- LANTERNA, G., y MATTEINI, M. (2000): «Laser cleaning of stone artifacts: A substitute or alternative method?». *Journal of Cultural Heritage*, 1: 529-535.
- LEE SCOTT, C. (2012): *The Use of Agar as Solvent Gel in Objects Conservation*. AIC 40th Annual Meeting, Research & Technical Studies Session. Volume 3. Washington: American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works, pp. 71-83.
- MARCOS-FERNÁNDEZ, F.; ORTEGA, F.; PÉREZ GARCÍA, A.; CAMBRA MOO, O., y ESCASO, F. (2011): «¿Hasta dónde llegamos? Preparación de restos apendiculares de saurópodos titanosaurios del Cretácico Superior de Lo Hueco» (Fuentes, Cuenca). II Workshop de Conservación Preparación-Restauración en Ciencias Naturales. Institut Català de Paleontologia Miquel Crusafont, Sabadell. 18-21 de junio de 2011.
- MARCOS-FERNÁNDEZ, F.; BLANCO, M.; DÍAZ, D., y ORTEGA, F. (2013): *Laser cleaning of macrovertebrate fossils from the Upper Cretaceous site of «Lo Hueco» (Cuenca, Spain)*. Program and Abstracts of the 73rd Meeting of the SVP. Supplement to the online *Journal of Vertebrate Paleontology*, 171. L. A., USA.
- MARCOS-FERNÁNDEZ, F.; SERRANO-MARTÍNEZ, A., y ORTEGA, F. (2016): «Analytical techniques for marking protocols in paleontological preparation». En F. TORCIDA FERNÁNDEZ-BALDOR, J. I. CANUDO, P. HUERTA, y X. PEREDA (eds.), *Abstracts book of the VII International Symposium about Dinosaurs Palaeontology and their Environment*, 89-91.
- MARCOS-FERNÁNDEZ, F., y ORTEGA, F. (2016): «Conservation Status of the Paleontological Collection of Lo Hueco». En F. HOLWERDA, A. MADERN, D. VOETEN, A. VAN HETEREN, H. MEIJER y N. DEN OUDEN (eds.). XIV Annual Meeting of the European Association of Vertebrate Palaeontologists, 6-10 July 2016, Haarlem, The Netherlands, Programme and Abstract Book Haarlem: 67.
- ORTEGA, F. (2007): «Tratamientos químicos en la preparación de restos fósiles de vertebrados. Aplicación al yacimiento de Las Hoyas». *¡Fundamental!*, 10. Laboratorio de Paleontología. Fundación Conjunto Paleontológico de Teruel-Dinópolis, pp. 65-75.
- ORTEGA, F. *et al.* (2008): «El yacimiento de macrovertebrados fósiles del Cretácico Superior de «Lo Hueco» (Fuentes, Cuenca)». *Palaeontologica Nova. Publicaciones del Seminario de Paleontología de Zaragoza*, 8: 119-131.

- ORTEGA, F. *et al.* (2015): «The biota of the Upper Cretaceous site of “Lo Hueco” (Cuenca, Spain)». *Journal of Iberian Geology*, 41 (1): 83-99.
- RIXON, A. E. (1976): *Fossil Animal Remains: Their preparation and conservation*. Londres: Athlone Press.
- SABATINIA, G.; GIAMELLOA, M.; PINIB, R.; SIANOB, S., y SALIMBENIB, J. (2000): «Laser cleaning methodologies for stone facades and monuments: laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture». *Journal of Cultural Heritage*, 1: 9-19.
- STRIOVA, J.; ANZANI, M.; BORGIOLI, A. *et al.* (2013): *A novel approach: laser cleaning intermediated by agar gel*. Lasers in the Conservation of Artworks IX (LACONA). Londres: Archetype Publ., 249-250.
- TORTAJADA, S., y BLANCO, M. (2013): «Cleaning plaster surfaces with agar-agar gels: evaluation of the technique». *Ge-conservación*, 4: 111-126.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE EDUCACIÓN, CULTURA
Y DEPORTE