

La Investigación sobre Patrimonio Cultural

Cesáreo Sáiz Jiménez y
Miguel Ángel Rogerio Candelera
(editores)



LA INVESTIGACIÓN SOBRE PATRIMONIO CULTURAL

Editado por

Cesáreo Sáiz-Jiménez y Miguel Ángel Rogerio-Candelera

*Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla
Consejo Superior de Investigaciones Científicas*



Sevilla, 2008

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transcribirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información y sistema de recuperación, sin permiso escrito de la Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural.

Cubierta: *La Giralda desde el Patio de Banderas*, grabado de Norberto León Ríos

© Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural, 2008

Editores: Cesáreo Sáiz Jiménez y Miguel Ángel Rogerio Candelera
Diseño y maquetación: Miguel A. Rogerio
Edita: Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural
Imprime: Coria Gráfica

Depósito Legal: SE-555-08
I.S.B.N.: 978-84-691-0049-3

Impreso en España – Printed in Spain

Prefacio <i>C. Sáiz-Jiménez</i>	vii
Las Humanidades en la actualidad. El Patrimonio como ejemplo <i>F. Criado-Boado</i>	1
Estudio de materiales y técnicas de realización utilizadas en obras de arte y sus procesos de alteración <i>J.L. Pérez-Rodríguez, A. Justo, A. Durán, M.C. Jiménez de Haro, B. Sigüenza, L.K. Herrera, C. Odrizola, H. Herrero Fernández y M.L. Franquelo</i>	15
Morteros en el Patrimonio: conservación y reparación <i>S. Martínez Ramírez, F. Puertas y M.T. Blanco-Varela</i>	35
Nuevas estrategias en el estudio arqueométrico de vidrios históricos <i>N. Carmona, M. García-Heras y M.A. Villegas</i>	49
La evolución tecnológica, un elemento fundamental del Patrimonio Cultural e Histórico de la cerámica y el vidrio <i>C. Pascual, P. Recio, E. Criado, F. Capel, S. de Aza y F.J. Valle</i>	67
Metodología en la Conservación del patrimonio arquitectónico medieval <i>A. Almagro, J. Navarro y A. Orihuela</i>	87
Arqueología de la Arquitectura y Patrimonio Edificado. Experiencias y perspectivas una década después <i>M.A. Utrero Agudo</i>	99
El <i>Laboratorio de Arqueoloxía da Paisaxe</i> del IEGPS: contribuciones desde la Arqueología al Patrimonio Cultural <i>F. Criado-Boado, D. Barreiro y C. Parcero-Oubiña</i>	119
Arqueometalurgia: Historia y tecnología <i>A. Perea, B. Armbruster, I. Montero Ruíz y S. Rovira Llorens</i>	129
Los paisajes culturales preindustriales. Patrimonio y recursos sociales <i>F.J. Sánchez-Palencia, A. Orejas, I. Sastre y M. Ruíz del Árbol</i>	143
Metodologías láser para la conservación del Patrimonio Cultural <i>M. Oujja, S. Gaspard, M. Walczak, M. Martín y M. Castillo</i>	159
Aplicaciones de la espectroscopía Raman intensificada por superficies metálicas nanoestructuradas (SERS) a la determinación de pigmentos y tintes orgánicos de interés en el Patrimonio Cultural <i>Z. Jurasekova, M.V. Cañamares, S. Sánchez-Cortés, C. Domingo y J.V. García-Ramos</i>	169
Diagnóstico de procesos de biodeterioro por combinación de microscopía <i>in situ</i> y técnicas de biología molecular <i>A. de los Ríos, B. Cámara, J. Wierzchos y C. Ascaso</i>	183
Microbiología y Patrimonio Cultural <i>C. Sáiz-Jiménez y J.M. González Grau</i>	197

La Petrología: una disciplina básica para el avance en la investigación y conservación del Patrimonio <i>R. Fort, M.A. García del Cura, M.J. Varas, A. Bernabéu, M. Álvarez de Buergo, D. Benavente, E. Pérez-Monserrat, J. Martínez-Martínez y M.C. Vázquez-Calvo</i>	217
Geología - Geoquímica - Microclima aplicados a la conservación del Patrimonio <i>S. Sánchez Moral, S. Cuezva, A. Fernández Cortes y J.C. Cañaveras</i>	240
Índice de autores	257
Láminas	259

PREFACIO

La Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural integra desde 2001 más de treinta Grupos de Investigación de dieciocho Institutos, que se agrupan en cinco áreas de trabajo:

- Arqueología y Patrimonio Arquitectónico
- Química y Materiales
- Física
- Geología
- Biología

La Red desarrolla una importante labor de investigación y difusión de sus actividades en el ámbito del Patrimonio Cultural a los usuarios finales: Ministerio de Cultura, Consejerías de Cultura de las distintas Comunidades Autónomas, Museos, Instituciones Locales, Fundaciones y Empresas. Asimismo, el conocimiento de las distintas líneas y técnicas de actuación de los grupos permitirá abordar de forma transdisciplinar los problemas a resolver y la presentación conjunta de proyectos en programas nacionales y comunitarios, así como la firma de convenios de colaboración.

Una de las actividades más relevantes se centra en la organización de las Reuniones Temáticas en las que participan tanto los grupos integrados en la Red del CSIC, como los procedentes de otras instituciones. Desde su constitución se han celebrado ocho reuniones, que desde el año 2004 tienen carácter anual.

En esta ocasión, el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla organiza la Reunión bajo el lema *Avances Recientes en la Investigación del Patrimonio*. El objetivo es dar a conocer las investigaciones llevadas a cabo por los distintos grupos de la Red, de entre los que se ha seleccionado 15 comunicaciones orales, que son las que se presentan en este volumen, así como una Introducción. Además, en la Reunión se presentan más de 20 comunicaciones libres, en forma de póster, cuyos resúmenes se incluyen en un volumen adicional.

Ambos volúmenes permiten comprobar la calidad, cantidad e interés de las investigaciones que se llevaron y se llevan a cabo en el área de Patrimonio Cultural en el CSIC y confiamos que su conocimiento permitirán a otros investigadores, organismos y entidades interesados en la investigación en este área el poder establecer colaboraciones con los grupos de la Red Temática del CSIC.

Sevilla, 25 de enero de 2008

Cesáreo Sáiz Jiménez
Coordinador

LAS HUMANIDADES EN LA ACTUALIDAD. EL PATRIMONIO COMO EJEMPLO

Felipe Criado-Boado

Coordinador científico-técnico del Área de Humanidades y Ciencias Sociales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano 113
28006 Madrid

1. INTRODUCCIÓN: LAS HUMANIDADES FRENTE A LAS CIENCIAS

Por su dimensión social y cultural, las Humanidades y Ciencias Sociales son determinantes en la generación y reproducción de conocimiento. Sin embargo, tradicionalmente, las Humanidades han estado marcadas por un tópico que las situaba al margen de las líneas y dinámicas generales de la ciencia y la tecnología. No siendo, incluso, extraño oír voces que propugnaban la separación total de éstas respecto al cuerpo principal y (por lo tanto) a las instituciones canónicas de la ciencia.

Esta posición es fruto de una historia muy larga que no es procedente glosar aquí. Enraiza con temas básicos del pensamiento occidental y con la filosofía de la Ilustración y la modernidad, con la dicotomía entre ciencias naturales y ciencias del espíritu, y con otras dualizaciones como la que distingue entre ciencias explicativas (las naturales, exactas y tecnológicas) y ciencias narrativas (las de humanidades). Incluso se ha discutido si es procedente aplicar a éstas el estatuto mismo de “ciencia” o su adjetivación como “científicas”; por ello el estatuto un poco más indefinido, pero sin embargo muy concreto, de “disciplinas” les va mejor.

Un cierto victimismo inherente a muchos humanistas ha propugnado y propugna que esta visión tópica ha sido extendida desde las ciencias hacia las humanidades. Pero esa visión, como casi cualquier visión que pone la causa en el otro o lo otro, minusvalora la propia responsabilidad de la posición humanística típica en este debate. Pues muchas veces han sido estas disciplinas, y sus afanados practicantes, los que han hecho bandera de su excepcionalidad respecto a las restantes ciencias, de su especificidad respecto a éstas. A tenor de estos argumentos, nada de lo que en otras disciplinas es habitual y está admitido, es normal ni admisible en las humanidades: ni la validez del criterio de certeza, ni la relevancia práctica de las disciplinas, ni el imperativo de aplicación, tampoco los medios habituales de publicación, ni los criterios de evaluación o de composición curricular. El debate es largo y complejo, pero algo es obvio: si uno quiere integrarse con otros, no puede a priori postular que es distinto y sus diferencias irreductibles.

En este contexto, la estrategia actual que está siguiendo el Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC está orientada a cumplir, también en estas disciplinas, los objetivos que la transformación del CSIC en Agencia establecen para todo este organismo y que no son otros que alcanzar altas cotas de excelencia e internacionalización, y contribuir con solvencia, desde la frontera del conocimiento, a los grandes debates sociales y culturales de nuestro tiempo. Estos objetivos enraízan en la nueva misión que el Estatuto de la Agencia marca al CSIC:

“fomento, coordinación, desarrollo y difusión de la investigación científica y tecnológica, de carácter pluridisciplinar, con el fin de contribuir al avance del conocimiento y al desarrollo económico, social y cultural, así como a la formación de personal y al asesoramiento a entidades públicas y privadas en esta materia”.

En este texto se presenta la situación actual del Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC y la orientación de transformación que sigue en la actualidad. Como ejemplo y, al tiempo, principal actuación de esta estrategia, se detalla la creación del nuevo Centro de Ciencias Humanas y Sociales, en Madrid. Y se vuelca toda esta argumentación sobre la investigación en Patrimonio Cultural no sólo para reflexionar sobre la actualidad y potencialidades de la misma, sino para mostrar la virtualidad de este campo como un horizonte de inflexión y actualización del Área de Humanidades y Sociales.

2. LA CONVERGENCIA DE LAS HUMANIDADES COMO CIENCIAS

Siendo pragmáticos, la superación de los debates anteriores es muy fácil. Es cierto que hay buenas razones para postular que las disciplinas humanísticas no se acomodan bien al criterio normativo de "ciencia"; la única excepción real a esta realidad es la *Lingüística*. Es cierto que hay algunas razones para preconizar lo contrario. También es cierto que la creación de conocimiento es factible a partir de diferentes saberes y con diferentes métodos: ni las ciencias ni el método científico tienen el monopolio hoy de la producción de conocimiento. Por lo tanto el debate entre ciencia y no-ciencia no está predeterminado por un sesgo preferente en beneficio del primer término de la comparación y una minusvaloración del segundo, como en el pasado. Al final, sin embargo, las preguntas importantes son: qué conocimiento queremos y para qué sociedad lo queremos.

Si contestamos esas preguntas desde dentro de una institución de investigación científica, entonces es obvio que deben prevalecer los estudios basados en el método científico y otras metodologías rigurosas de investigación. Si no es así, hay una equivocación de base, que no es otra que confundir el terreno de juego. Cada uno es libre de elegir el campo de juego, pero tiene que atenerse a los límites de aquél en el que juega.

En el Plan Estratégico del Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC vigente para el periodo 2006-2009, se opta por el término "ciencias humanas" y no "humanidades" porque el CSIC ha decidido que en el área prevalezca una investigación orientada a la producción de conocimiento científico, basado en *modelos teóricos* robustos e informado por *evidencias empíricas* rigurosas. Es decir, una investigación basada en una *disciplina* estricta, de ahí que este término constituya el concepto más adecuado para referirse a estas "ciencias", soslayando en cambio el debate banal sobre si son científicas o no las Humanidades. El fin de esta propuesta es avanzar en la homologación del área con las otras áreas que constituyen un organismo como el CSIC orientado hacia la producción de conocimiento científico de calidad.

No es difícil justificar esta opción en el caso del CSIC, a diferencia de otros organismos como las Universidades en las que resultaría en cambio muy complejo. Por una razón contextual concreta:

Las Humanidades son más vastas que las ciencias humanas, pues aquellas incluyen asimismo la creación y la narrativa. El campo de las Humanidades en el CSIC, y no sólo en términos cuantitativos (en 2004, las 39 áreas universitarias a las que se adscribió el personal científico del Área de Humanidades y Sociales del CSIC, agrupaban a 9.565 profesores frente a los 253 científicos existentes en el CSIC), es menos comprensivo que el campo de las Humanidades en las universidades: no incluye aquellas disciplinas más relacionadas con la *creación, las poéticas, retóricas, narrativas y jurídicas*, disciplinas que presentan un tipo de hermenéutica distinta a la de la Historia, la Antropología, la Arqueología, los estudios culturales, etc.

En total, en el año 2003 había en las universidades españolas un total de 11.694 profesores en todas las áreas universitarias de Humanidades. En las de Ciencias Sociales había 26.266, lo

que supone entre las dos subáreas 37.960, frente a los 86.105 profesores del sistema universitario total. Si en vez de contabilizar número de profesores, se contabiliza el número de investigadores presentes en el Plan Nacional en 2003, estas cifras se reducen a 3.851 en Humanidades y 7.397 en Ciencias Sociales (total: 11.248), lo que refleja sólo una tercera parte del profesorado total está simultáneamente activo en labores de investigación científica; (cf: estas cifras están tomadas del *Libro Blanco sobre la Investigación en Humanidades*, publicado por FECYT).

Por lo tanto, todas estas cifras no sólo representan el escaso tamaño del área de Humanidades y Ciencias Sociales (HCS) del CSIC (contrastando en cambio con su mayor producción científica), sino sobre todo su mayor especialización temática y metodológica si se compara con las Universidades.

La opción del CSIC a favor de las ciencias humanas no supone una aceptación acrítica del valor objetivo del método científico, sino una voluntad de centrarse en aquellos ámbitos de las humanidades que generan resultados convalidables, por su método, su aplicación o su publicación, con las restantes disciplinas científicas, dejando en cambio al margen los otros tipos de saberes humanísticos. Esta opción no minusvalora la aportación de éstos últimos, sino que simplemente reconoce que (como se mostró con los datos anteriores) en el CSIC, a diferencia de las Universidades, éstos no están representados.

Al hilo de esta propuesta estratégica se propugna, en el horizonte de la nueva Agencia CSIC, cambiar el nombre del área misma para denominarla "Ciencias Humanas y Sociales". El cambio de nombre no es simplemente nominalista. Pretende contribuir a la modificación de la cultura de trabajo que el CSIC debe auspiciar. En este sentido, la propuesta incluye una nueva definición de la misión del área que, consonantemente con la nueva misión del CSIC, sería:

Producir, a través de la investigación científica, conocimiento riguroso sobre la realidad social con el fin de explicar sus mecanismos de producción y reproducción, y contribuir así a la transformación de la sociedad y al crecimiento del bienestar social mediante el incremento de la autoconciencia y la reflexividad, mediante la generación de contenidos, críticas y valores, y mediante la definición de horizontes concretos de aplicación y revalorización.

En este contexto de cambio, el Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC presenta en la actualidad un gran dinamismo. Está inmersa en un intenso proceso de normalización: su productividad avanza, alcanzando niveles semejantes o incluso superiores a las de otras Áreas y se extienden entre su personal las actitudes y procedimientos de las comunidades e instituciones científicas avanzadas.

En el año 2005 los 19 institutos del Área de Humanidades y Ciencias Sociales del CSIC, ocupaban a casi 1100 personas; 267 eran científicos de plantilla (un 10% del total en el CSIC), 256 personal funcionario de otras categorías, 106 personal laboral fijo, y cerca de 400 becarios predoctorales, contratados con cargo a proyectos y contratados post-doctorales. Durante el año 2004 estuvieron vigentes 126 proyectos de investigación financiados con cargo al Plan Nacional, Planes Regionales o fondos europeos, por valor de 3.561.413 €, lo que representó un crecimiento del 42 % respecto al 2003. Al mismo tiempo se realizaron 70 contratos y convenios de investigación con diferentes instituciones e instancias, que reportaron al CSIC una captación de financiación externa de 5.363.895 €. La producción científica en 2004 llegó a 1772 documentos (crecimiento anual, 10%): 281 artículos en revistas del SCI (crecimiento anual, 28 %) 555 artículos en otras publicaciones (crecimiento anual, 11 %), 48 tesis doctorales (crecimiento anual, 17%) y 596 libros. Se organizaron 291 cursos de postgrado y especialización (crecimiento anual 9 %). Estos datos exhiben la riqueza y pluralidad de la

actividad de este Área, y muestran sus principales insuficiencias, así como su capacidad de renovación y modernización.

3. EL PLAN ESTRATÉGICO 2006-09 DEL ÁREA DE CIENCIAS HUMANAS Y SOCIALES

3.1. Principios Rectores

Las propuestas del Plan Estratégico 2006-2009 del Área buscan promover activamente y consolidar este proceso, incentivando la excelencia, renovando los recursos humanos, internacionalizando definitivamente la actividad de los Institutos y afirmando la relevancia social de su investigación. Los 5 principios rectores que inspiran el presente Plan Estratégico se pueden resumir de este modo:

1. Elevar la calidad y la visibilidad de la investigación del Área de Ciencias Humanas y Sociales, priorizando la excelencia y la internacionalización de las prácticas científicas: Incrementar la visibilidad internacional e impacto de las publicaciones y presencia del Área en ámbitos competitivos.
2. Renovar los equipos de investigación, aumentando su productividad e integración en las comunidades científicas de vanguardia internacional: Incorporar a los mejores investigadores mediante la búsqueda activa de talentos y prácticas de reclutamiento competitivas, transparentes y ampliamente publicitadas. Rejuvenecer el Área.
3. Identificar las líneas de investigación preferentes, para ordenar recursos y estimular las potencialidades del Área de Ciencias Humanas y Sociales incrementado la masa crítica de los Grupos de Investigación innovadores y competitivos, y mejorando sus condiciones infraestructurales y organizativas, y apostando por temas de investigación transversales, superadores de la tradicional orientación temática y basada en áreas de conocimiento universitarias. Las líneas reconocidas como prioritarias son las siguientes:
 1. Sociedad del conocimiento y políticas de desarrollo científico
 2. Inmigración: migraciones y estudios de población
 3. Teoría económica y Economía del Medio Ambiente
 4. Estudios políticos: desarrollo y democratización
 5. Diálogo intercultural
 6. Patrimonio Cultural
 7. "Área de estudios", incluyendo en ellos los Estudios Asiáticos y los Estudios Europeos
4. Cambiar la cultura de trabajo del Área, estimulando la interacción y cooperación entre investigadores, y con la sociedad. Promover el desarrollo armónico de las cinco dimensiones (captación de recursos competitivos, producción científico-técnica, interacción con el entorno, formación y cultura científica) que deben organizar la actividad científico-técnica. Priorizar la transferencia de conocimientos y tecnologías al entorno socio-económico. Desarrollar la interdisciplinariedad dentro de la propia Área de Ciencias Humanas y Sociales para acomodar la investigación a los temas anteriormente citados.
5. Estabilidad y evaluación. Establecer reglas de actuación estables (esto es, el Plan Estratégico de Área y los de cada Instituto), marcando con nitidez las directrices fundamentales, procedimientos, y criterios de decisión. Consolidar el recurso sistemático a la evaluación externa.

3.2. *Objetivos generales*

Una síntesis precisa del Plan Estratégico del Área de Ciencias Humanas y Sociales es decir que su objetivo esencial es el incremento de la calidad en la misma. Ello requiere específicamente: (i) Aumentar la visibilidad del Área y su reconocimiento internacional; (ii) Publicar al menos el 30% de la producción en revistas y editoriales internacionales de prestigio; (iii) Consolidar la presencia de la investigación del Área en revistas y colecciones de calidad ajenas al CSIC; y (iv) Priorizar la calidad frente a la cantidad.

Entre los objetivos que se identifican como esenciales, se encuentran (en la siguiente enumeración nos concentramos en aquellos temas que son de mayor relevancia para la finalidad del presente volumen):

- redefinir, reducir y priorizar las líneas de investigación, centrando la actividad en aquellas líneas propias del Área no suficientemente cubiertas en el sistema español de I+D, y en todo caso en aquellas que ofrecen un valor añadido especial en relación con las líneas alimentadas en las Universidades.
- identificar y promocionar los Grupos de Investigación existentes y fomentar la creación de Grupos nuevos.
- crear infraestructuras de apoyo y de investigación, Laboratorios de Servicios y de I+D y Plataformas Tecnológicas que permitan incrementar la capacidad competitiva del Área, respondan a demandas particulares de la investigación avanzada e innovadora y satisfagan necesidades del sistema español de I+D en Humanidades y Ciencias Sociales que, por su coste y alcance supra-territorial, no cubren las universidades ni las políticas de I+D autonómicas. En contra de la idea tradicional, hay que reivindicar que la investigación en Humanidades también precisa de Infraestructuras de Apoyo y Servicios Horizontales, de Laboratorios incluso, importantes. Esto es particularmente cierto en el caso de la investigación en Patrimonio Cultural.
- potenciar las Ciencias Sociales; en plena sociedad del conocimiento, son demasiado importantes como para mantenerlas en el estado de subdesarrollo estructural en el que hasta ahora han permanecido en el CSIC. Es necesario repensar el vínculo entre las Humanidades y las Ciencias Sociales, superando una tendencia de división del Área y que no es realista no sólo por el pequeño tamaño de ambas sub-áreas, sino también porque la creación de sinergias entre una y otra es la mejor garantía de progreso para ambas.
- buscar un horizonte de aplicación para las Humanidades y Ciencias Sociales que permita potenciar la I+D, promover la transferencia de conocimiento y tecnología en el Área e incentivar su rentabilidad práctica. El Área deberá abrirse al entorno socio-económico, acentuando la transferencia de conocimiento, y apostando por temas (Patrimonio Cultural, Globalización, Interculturalidad, Innovación, Desarrollo sostenible...) cuya relevancia social ofrece grandes oportunidades para ofrecer conocimiento experto que informe la toma de decisiones de las políticas públicas y acción de las Administraciones, y otros agentes sociales.
- potenciar la colaboración entre Institutos que, en general, no ha existido en el pasado o en todo caso no ha sido sistemática ni corriente.

3.3. Líneas de Actuación

De acuerdo con los principios rectores y los objetivos generales glosados hasta aquí, el Plan Estratégico formula propuestas organizativas, científicas y funcionales, en 12 líneas de actuación distintas, de las que, nuevamente, detallaremos aquellas más importantes o significativas para el efecto del presente volumen:

Grupos de Investigación

Se propone una política sistemática de definición, promoción y encuadre de Grupos de Investigación, como unidad funcional básica en los institutos, promoviendo la masa crítica y tamaño de los Grupos, permitiendo su consolidación y prestando atención a sus demandas (de personal técnico y disposición de recursos económicos propios), especialmente en el caso de aquellos más dinámicos, productivos e innovadores. En este sentido se considera de particular importancia aportar financiación basal a los Grupos, sobre la base de la evaluación de su productividad y tradición anterior, pero evitando al mismo tiempo la merma de su competitividad externa.

Red de Servicios de Apoyo a la Investigación

Se promueve la creación en sus Institutos de Unidades de apoyo a la investigación, Laboratorios y Plataformas Tecnológicas que, sobre la base en las fortalezas específicas de los Institutos, se desarrollen con una perspectiva unitaria y sistémica de Área, combinando las iniciativas de cada Instituto, procurando crear sinergias entre ellos, y evitando errores de diseño y disciplina de trabajo frecuentes en otras áreas científicas, debido a la larga historia de los laboratorios dentro de ellas. Al calor de esta línea de actuación, se está haciendo un gran esfuerzo en concreto en la Red de Unidades Horizontales del nuevo Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CCHS) (ver el siguiente apartado).

Transferencia de Conocimiento

Se propone la creación de un equipo profesional de promotores de la transferencia de conocimientos especializados en el Área de Ciencias Humanas y Sociales, que colaboren con el colectivo de investigadores para ayudarles a identificar sus potencialidades y a proyectar con mayor alcance la aplicación social de su investigación y conocimientos. En concreto, la investigación en Patrimonio tiene una elevada capacidad de transferencia de tecnología y resultados que puede ser una referencia para el resto del área.

Programas de Investigación Inter-disciplinares y Transversales

Se formulan propuestas para la puesta en marcha de diversos programas científicos intra-área. Entre ellos destaca la promoción de la investigación en Patrimonio (objetivo asumido y reconocido como tal en el Plan de Actuación general del CSIC para el periodo 2006-2009) y la constitución de tres Observatorios para los cuales existe una firme demanda y oportunidad social y política: Observatorio de la Inmigración, Observatorio de la Ciudad, Observatorio de Ciencia y Tecnología.

Programas Movilizadores y Horizontales

Entre las iniciativas de este tipo citadas, se sitúa la creación de una Infraestructura de Datos Especiales para el CSIC que busque fórmulas para movilizar y compartir el inmenso patrimonio de información (datos, documentos y otros formatos), que se produce y almacena en los institutos del Área de Ciencias Humanas y Sociales.

Difusión, Formación y Cultura Científica

Se proponen cuatro acciones esenciales para incrementar la calidad de las acciones de difusión y divulgación organizadas por los investigadores e institutos del Área: Creación de una unidad de Apoyo a la edición de Revistas Científicas en Humanidades y Ciencias Sociales; creación de

una Unidad de apoyo a la formación de postgrado y especializada que, sin duplicar sus funciones con el Departamento de Postgrado, ofreciese a los investigadores e institutos del Área de Ciencias Humanas y Sociales el apoyo necesario para diseñar y llevar a efecto una oferta sólida de formación especializada; definición de una estrategia coordinada de acciones de difusión y divulgación en el seno del Área; fomento y potenciación de la visibilidad del Área en los medios de comunicación mediante la orientación práctica a investigadores e institutos para relacionarse con éstos.

Revistas y Colecciones Propias

Se promueve una reorientación en la política editorial con el fin de mejorar la calidad científica de las publicaciones propias del Área, tanto revistas como colecciones de monografías, con énfasis en mejorar la presencia nacional e internacional de las mismas. Se propone que buena parte de lo publicado en nuestras revistas y colecciones se haga en una lengua extranjera, preferiblemente el inglés, para intentar situar las colecciones de publicaciones, en el flujo y en el debate internacional de las diferentes disciplinas. Se debe desalentar el uso de las publicaciones propias como herramienta para la construcción acelerada de *curricula* de investigadores.

Indicadores de Calidad y Evaluación de Resultados de la Actividad Investigadora

Correlativamente con lo anterior, se aspira a un incremento muy importante en la producción publicada por editores internacionales (artículos, capítulos y monografías), y una reducción en el peso relativo de la investigación que se auto-edita o se edita bajo controles de calidad cuyo poder de decisión está en el entorno inmediato (servicio de publicaciones del CSIC u otros). Para ello se propone que al término del Plan Estratégico, manteniendo la producción total en un nivel similar, los institutos deberán certificar internacionalmente el 30% del total de su producción. Se fija, incluso, un parámetro de *productividad media por investigador en un periodo de 5 años* que, basándose en las pautas de actividad del Área y en los indicadores de productividad de los institutos, se establece en: 2 artículos ISI, 2 artículos internacionales, 4 en revistas nacionales (incluyendo entre ellos congresos y capítulos de libros) y 1 libro o monografía. En todo caso estas cifras pretenden ser sólo un punto de referencia a los institutos, grupos e investigadores.

3.4. Claves y Tendencias: keywords

El horizonte obvio es la incorporación de las ciencias humanas y sociales a la misión principal del CSIC: producir y transferir resultados de investigación para crear una sociedad basada en el conocimiento y la innovación. En este contexto, la investigación interdisciplinar en Patrimonio, a la que las ciencias humanas e incluso las sociales pueden contribuir significativamente, adquiere nuevo significado, porque ella se adapta perfectamente al planteamiento del Plan Estratégico y aporta un modelo riguroso para llevar a efecto sus objetivos.

Las palabras clave que definen este contexto son: Actividad científica en Disciplinas Humanas y Sociales; normalización; modernización; internacionalización; transferencia; incremento del nivel medio de calidad; excelencia; visibilidad; desarrollo equilibrado y armónico (dentro del Área y entre Institutos); excepcionalidad y especialización; diferenciación de las universidades; transversalidad; Grupos de Investigación como agentes esenciales; incremento de masa crítica; programas movilizados; producción de valor en el Área y para el CSIC; planificación estratégica; programación por objetivos; evaluación de su cumplimiento; distribución de recursos en función de los objetivos cubiertos.

4. LA CREACIÓN DEL CENTRO DE CIENCIAS HUMANAS Y SOCIALES (CCHS)

Si el Patrimonio Cultural es un ejemplo del tipo de programa transversal que el Plan Estratégico de la nueva Área de Ciencias Humanas y Sociales representa, la creación del CCHS en Madrid

es un ejemplo del tipo de Centros y relaciones de trabajo que materializa el Plan Estratégico. Damos a continuación unas indicaciones sobre este proyecto por cuanto es la principal actuación del Área en este Plan y porque a él pertenecen buena parte de los grupos de investigación en Patrimonio del CSIC.

La creación del CCHS representa de hecho la principal actuación acometida por el CSIC en su historia en el ámbito de las Ciencias Humanas y Sociales. No existe asimismo ningún proyecto semejante en toda Europa. Fue creado oficialmente por órganos de gobierno en octubre de 2007, finalizando la mudanza de los siete institutos que lo integran en noviembre de ese año. Con ello culminó un largo proceso que se inició en el año 2001, bajo la presidencia de Rolf Tarrach y siendo coordinador de área José Ramón Urquijo. La primera necesidad que aquella presidencia detectó, fue mudar los institutos de humanidades y ciencias sociales de Madrid a un nuevo emplazamiento para con ello favorecer su desarrollo y crecimiento, y la mejora de sus condiciones de trabajo. Esa inquietud condujo pronto a la necesidad de articular un nuevo proyecto científico que dotara de sentido a esa operación.

De hecho, y aunque no exenta de riesgos, la convergencia en un único complejo de los Institutos de Humanidades y Ciencias Sociales de Madrid fue la ocasión para lanzar un gran proyecto científico que sirva como ejemplo de la renovación del Área en el CSIC y en todo el Estado. Para ello fue necesario profundizar en el proyecto científico del nuevo centro, cargarlo de contenido transformador, y abordar una reestructuración realista pero ambiciosa. El Plan Estratégico vigente prioriza este Centro y lo hace detrayendo recursos de los Institutos del Área situados fuera de Madrid. Por lo tanto, la auténtica significación de esta prioridad viene dada por su "coste de oportunidad", pues la asignación a los restantes Institutos de sólo una fracción de los recursos ubicados en el nuevo CCHS, incrementaría notablemente su capacidad competitiva e impacto en su entorno (científico y local).

Las cifras del CCHS hablan por sí mismas de esta operación:

Tiene 60.000 m², una biblioteca con 21 km de estantería, 700.000 monografías, más de un millón de volúmenes, 11.000 revistas y 300.000 volúmenes en libre acceso; un aparcamiento subterráneo con 410 plazas. Agrupa 66 Grupos de Investigación y, a finales de 2007, 210 Investigadores de plantilla, 62 Doctores contratados, 92 becarios predoctorales y contratados, 294 plazas de Personal de apoyo y servicios (de ellos 227 como funcionarios o laborales fijos), y 27 más (entre investigadores y técnicos) adscritos en la oferta de empleo de 2007. En total por lo tanto un Centro de 685 personas. Eso supone el 72,6 % del personal investigador en plantilla del Área y el 74 % de su personal total. Y, lo que es casi más representativo, el 8,23 % *del personal investigador en plantilla del CSIC*, y el 6,70 % *del personal total del CSIC*.

Las cifras sin embargo no permiten elucidar la operación científica que está detrás del CCHS. El propósito no es crear un "centro de servicios" que aglutine institutos distintos, sino crear un nuevo modelo de Centro de Investigación para potenciar la investigación en CCHH y CCSS. Un centro que disponga de dirección científica integrada y en el que se lleve a efecto una concentración significativa de masa crítica, Investigación interdisciplinar, maximización de las transversalidades, renovación de la agenda científica, Diferenciación de las universidades, y superación de las disciplinas basadas en áreas de conocimiento universitarias.

Los siete institutos que lo componen compaganan por lo tanto una estrategia unitaria que hace de este Centro lo más equivalente a una Gran Infraestructura de Investigación en CCHH y CCSS. Estos institutos son: El Instituto de Historia (IH), el Instituto de Lenguas y Culturas del Mediterráneo y Oriente Próximo (ILC, antes IFL), Instituto de Lengua, Literatura y Antropología (ILLA, antes ILE), Instituto de Filosofía (IFS), Instituto de Economía, Geografía y Demografía (IEGC, antes IEG), Instituto de Estudios Documentales sobre Ciencia y Tecnología (IEDCYT,

antes CINDOC), e Instituto de Políticas y Bienes Públicos (IPP, creado por transformación de la anterior UPC).

Este carácter potencial de Gran Infraestructura, se lo confiere asimismo la red de Unidades Horizontales de investigación creadas dentro del Centro, y que nacen con una plantilla técnica total de 122 personas (esto sin incluir en ellas la Biblioteca, que dispone de 50 plazas más). La red incluye tres tipos de Unidades: unidades de apoyo, unidades de servicio y laboratorios de investigación, entre ellas, las siguientes:

- Unidad de edición digital y diseño gráfico
- Unidad de actividades científicas y difusión de la cultura científica
- Unidad de captación de recursos y gestión de proyectos
- Unidad de transferencia de conocimiento científico
- Unidad de postgrado y formación
- Unidad de Tratamiento de la Documentación Textual
- Unidad de Tratamiento de la Documentación Visual y Sonora
- Unidad de Tratamiento de la Documentación Arqueológica
- Unidad de Documentación Cartográfica
- Unidad de Sistemas de Información Geográfica
- Unidad de Estadística
- Laboratorio de Arqueobotánica
- Laboratorio de Arqueometría
- Laboratorio de Arqueología del Paisaje y Teledetección
- Laboratorio de fonética
- Laboratorio "Portal de Mayores"

No es baladí destacar que ninguna institución de investigación en Humanidades y Ciencias Sociales en España, y posiblemente muy pocas en el extranjero, disponen de una red de servicios de esta complejidad y ambición.

5. TREINTA Y DOS PRINCIPIOS TEÓRICO-PRÁCTICOS PARA LA INVESTIGACIÓN EN PATRIMONIO Y SU INTERRELACIÓN CON LA GESTIÓN SOSTENIBLE DEL MISMO

Para finalizar la introducción de este volumen, he optado por incluir a continuación las consecuencias de un Seminario sobre Patrimonio celebrado en diciembre de 2004 en el *Seminario de Guadalupe*. En él participaron especialistas del CSIC y otras instituciones, reunidos bajo el título común *Las Humanidades y el Patrimonio Cultural: entre los Monumentos y la Memoria*.

Entre los dos acontecimientos distintos que se recogen en este texto (la orientación estratégica del Plan de Actuación del área de Ciencias Humanas y Sociales y las conclusiones de ese Seminario), no hay más relación que el hecho de que ambos fueron coordinados por la misma persona (el autor de estas líneas) y planteados con el propósito explícito de dar salida a la demanda de modernización de esas disciplinas planteada por muchos investigadores de humanidades y sociales y por muchos profesionales del Patrimonio. El Seminario de Guadalupe intentó ofrecer un ejemplo de cómo la investigación en Patrimonio puede contribuir a una actualización efectiva de las Humanidades que añada valor a temáticas transversales y de profundo sentido interdisciplinar. Creo que éste es el argumento que interesa a este volumen y a la reunión que él representa. Por eso me parece interesante divulgar aquí esas consecuencias.

Por otra parte, estas propuestas permanecen inéditas y sin embargo pueden ser muy útiles. Aunque había planes de publicación del Seminario de Guadalupe, éstos van retrasados.

Los principios que marcan estas propuestas derivaron de la ponencia particular que cada autor presentó. La discusión conjunta y la acomodación del programa del Seminario a una línea temática y argumentativa unitaria, permitió que las consecuencias alcanzadas conformen un sistema de principios teórico-prácticos integrado.

Por esta misma razón, y en puridad, debe reconocerse que el presente apartado constituye un texto multiautor, elaborado en grupo por todos los participantes en el Seminario, a saber (y en orden de participación y por lo tanto contribución a la redacción de los siguientes principios: se indica a lado de cada nombre su contribución concreta a ciertos principios): Almudena Hernando Gonzalo (UCM, principios 1 a 3), Felipe Criado Boado (CSIC, 4 a 6), Almudena Orejas Saco del Valle (CSIC, 7 a 10, y 24 a 28), Cesáreo Sáiz Jiménez (CSIC, 11 a 13), José Antonio Lasheras Corrucho (Museo Nacional y Centro de Investigación de Altamira, 14 a 16), Agustín Azkarate Garai-Olaun (UPV-EHU, 17 a 19), María del Mar Villafranca (Conjunto de la Alhambra, 20 a 23), y Antonio Nicolau Martí (Museo de Historia de la Ciutat de Barcelona, 29 a 32).

Los principios son los siguientes:

1. El Patrimonio construye identidad en el presente. Refuerza los valores que nos representan como grupo. Refuerza la idea de que existimos en tanto que parte de un grupo.
2. Analizar la importancia que se concede al Patrimonio en distintos ámbitos sociales daría información sobre el desarrollo de la individualidad en la sociedad actual.
3. Presumiblemente, el Patrimonio Cultural irá ganando importancia en el futuro, a medida que la sociedad siga individualizándose. Su estudio, protección y conservación exigirán creciente atención y presupuesto, pues constituye un instrumento “cohesivo” de una sociedad que no puede permitirse la disgregación.

Por esta razón, el estudio de los procesos de Patrimonialización (esto es, el análisis de los contextos sociales de producción y resignificación del Patrimonio) es una parte básica de las investigaciones en Patrimonio Cultural.

4. El Patrimonio es la materialización de procesos sociales: sólo dentro de una comprensión histórica de esos procesos adquiere el Patrimonio su *sentido original*.
5. Esta Historia nos aproxima a mundos distintos: existió otra Humanidad, otra Realidad.

La lección que nos devuelve el Patrimonio, cuando miramos a la Historia desde un prisma mayor que el de nuestra experiencia y tradición cultural directa, es que Otro Mundo es posible porque existieron otros mundos antes de éste. Este *desideratum* tropieza con la inevitabilidad del presente, constreñido por el proceso actual de plena artificialización del Mundo.

6. El Patrimonio es (también) Paisaje y éste es (también) Cultural. Las Humanidades se vinculan, a través del Patrimonio, a temas importantes en la actualidad como la Ordenación del Suelo, el Turismo Cultural o el Desarrollo Sostenible.

Estos temas constituyen el *horizonte de aplicación* de esas disciplinas, el universo práctico sobre el que pueden adquirir auténtica relevancia social, justificar los recursos que necesitan y devolver a la sociedad conocimiento en forma de valor y de rentabilidad, gasto en forma de inversión.

7. La *complejidad del paisaje* exige su lectura en clave de procesos históricos que conectan pasado y presente y, por lo tanto, no se justifica ni una visión puramente estética del mismo, ni su caracterización simplista como marca de identidad excluyente.

No se trata sólo de una visión estratigráfica del paisaje sino de una perspectiva compleja, relacional que tiene en cuenta lo visible y lo invisible y por lo tanto va más allá de lo morfológico y de lo singular o excepcional.

8. El compromiso por conectar el pasado con el presente parte de que *el pasado es distinto, e implica el conocimiento y el reconocimiento del otro*. Se trata de integrar la diversidad espacial y temporal y no de contribuir a la fosilización del pasado.

La reivindicación de lo no-monumental no deriva de una visión iconoclasta: se trata de contextualizar lo singular en el marco de procesos históricos multidimensionales, infinitamente más apasionantes para el investigador y, si somos capaces de transmitirlo correctamente, para el conjunto de la sociedad. En especial, dadas las tendencias socioeconómicas recientes, la investigación no puede ignorar ni a visitantes ni a las poblaciones locales que han de poder acceder al conocimiento de su pasado y a su explotación como recurso.

9. En este sentido los especialistas e investigadores que trabajan en Patrimonio Cultural tienen algo que decir en los problemas de ordenación del suelo. Con ello no se trata de trivializar la investigación, sino de generar una corriente de mutuo enriquecimiento.
10. La consideración patrimonial del paisaje abre enormes posibilidades potenciales de gran relevancia social; en especial en regiones degradadas por el rápido abandono de actividades tradicionales y con bajo nivel de riqueza.
11. Los resultados de las investigaciones en el área de Patrimonio son, además, potencialmente aplicables a otras ramas del saber (control ambiental, industria farmacéutica, análisis clínicos, control de calidad, etc.), lo que supone una *transferencia de tecnología importante* y un aliciente más para la investigación de nuestro patrimonio histórico.
12. La *Red Temática de Patrimonio del CSIC*, por su carácter multidisciplinar, su proyección nacional e internacional, y el carácter innovador de sus propuestas, representa una decisiva apuesta por la aplicación de ciencia y tecnología al área de Patrimonio.
13. La coordinación de 30 grupos de investigación, por parte del CSIC, permite rentabilizar esfuerzos y fomentar la utilización de una infraestructura analítica moderna.
14. El Patrimonio, su estudio y disfrute, facilita la conquista de placer cultural e intelectual; ello, a la postre, nos permite ser mas humanos; tal y como avanza la historia, cualquier contribución a la humanización de los humanos es relevante.
15. Pero el Patrimonio ofrece asimismo instrumentos para el deleite, para recrearnos voluntariamente, para el ocio.
16. *Socializar la ciencia*, el conocimiento científico (el nuestro) y la información es nuestra contribución y nuestra responsabilidad –la de algunos, al menos-; además, retroalimenta la actividad científica; e incluso genera y redistribuye recursos

económicos. Es inevitable incurrir en la contraposición entre ocio y negocio (pero no es malo forzar las paradojas).

17. El patrimonio edificado representa uno de los mejores paradigmas de la materialización de la memoria en coordenadas espacio-tiempo observables. La estratigrafía constituye una de las herramientas más potentes. Dada su complejidad, el monumento no puede ser objeto de interpretación individual, sino social. Es preciso, pues, *articular las intervenciones como proyectos de conocimiento que trasciendan los límites disciplinares*. Su gestión deberá ser inevitablemente democrática.
18. Como constructo social, la resignificación que supone la intervención contemporánea, ha de estar abierta a la ciudadanía, que deberá participar activamente en la restauración de la memoria que se haga en cada momento.
19. Es necesario un cambio de mentalidad. *El Patrimonio Cultural no es un pasivo con el que debe cargar la sociedad, sino un activo económico de amplias posibilidades de futuro*. Hay que trabajar con esta convicción. Los investigadores deben superar tentaciones autistas y articular los proyectos de investigación no en función únicamente de sus intereses curriculares sino de necesidades sociales bien contrastadas.
20. El patrimonio, desde la perspectiva contemporánea debe constituir activa o receptivamente un *espacio de mediación cultural*. Más allá del contexto histórico que le dio origen su pervivencia actual nos transmite la síntesis de su valor como memoria colectiva. No basta con su conocimiento, además se tiene que disfrutar con su experiencia.
21. Una gestión profesional del Patrimonio contribuye a enriquecer la economía del entorno así como la calidad de vida de las personas. El patrimonio, entendido como recurso debe observar los principios de la teoría de la sostenibilidad y contribuir al enriquecimiento del bienestar social.
22. La excepcionalidad y calidad de algunos enclaves patrimoniales deben aprovecharse para el establecimiento de buenas prácticas y modelos de referencia para la cooperación internacional en esta disciplina.
23. Algunos ejemplos singulares del patrimonio permiten realizar una *lectura multicultural* considerada actualmente imprescindible para una comprensión integral de los valores del patrimonio como memoria de los pueblos. Para ello deben potenciarse las investigaciones que conduzcan a un mejor conocimiento de estos contextos culturales.
24. El patrimonio cultural es un recurso para la sociedad del siglo XXI en múltiples facetas: recurso informativo, formativo, recreativo, social, cultural y económico. La investigación puede reforzar estas distintas vertientes generando proyectos de calidad que coordinen el conocimiento y su difusión.
25. La concepción del patrimonio cultural está cambiando, tanto por la introducción de nuevos ámbitos (patrimonio intangible, paisajes culturales, elementos efímeros...) como por las nuevas propuestas sobre los polos tradicionales del patrimonio (conjuntos monumentales, museos...).

26. Un reto importante es la integración del patrimonio tanto en los medios urbanos, como peri-urbanos y rurales como factor de desarrollo y la implicación de los ciudadanos en proyectos patrimoniales.
27. La gestión del patrimonio cultural está estrechamente relacionada con otros ámbitos como el patrimonio natural y el turismo y es urgente una coordinación para generar propuestas coherentes en los planes de ordenación del suelo.
28. Las nuevas perspectivas sobre el patrimonio cultural se inscriben en un proceso global de reubicación de la investigación, en particular de las Humanidades y de las Ciencias Sociales, y de su papel en nuestra sociedad.
29. Los museos pueden y deben ampliar sus funciones para devenir instituciones útiles a la sociedad en términos de conocimiento aplicado. Algunos ejemplos para los museos de historia:

La planificación urbanística y el necesario conocimiento del patrimonio histórico urbano. Desarrollar planes de integración de las nuevas poblaciones también en términos de identidad/des. Participar en el tratamiento de los monumentos.

30. La arqueología urbana se debe entender como un factor de conocimiento del entorno urbano que puede contribuir a una planificación del territorio más eficaz y sostenible. Es necesario *ampliar el concepto de patrimonio* (el *valor de los símbolos en el mundo global*).
31. La dimensión histórica y patrimonial de la ciudad debe ser integrada en los Planes Estratégicos y desempeñar una función central en el posicionamiento de la ciudad en relación a sus propios habitantes (los de hoy y los que vienen) y en relación a los visitantes.
32. La valorización y revalorización del patrimonio cultural es una vía para mejorar la situación económica y social de la ciudad. Puede contribuir a la creación de riqueza, tanto como a un mejor equilibrio social entre sus habitantes. La ciudad es fruto de la diversidad, y el patrimonio es un buen ejemplo de ello.

ESTUDIO DE MATERIALES Y TÉCNICAS DE REALIZACIÓN, UTILIZADAS EN OBRAS DE ARTE Y SUS PROCESOS DE ALTERACIÓN

J.L. Pérez-Rodríguez, A. Justo, J. Poyato, A. Durán, M.C. Jiménez de Haro, B. Sigüenza, L.K Herrera, C. Odriozola, H. Herrero Fernández y M.L. Franquelo

**Instituto de Ciencia de Materiales de Sevilla
Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad de Sevilla
Avenida Américo Vespucio,49
41092, Isla de la Cartuja, Sevilla**

Resumen: El grupo de investigación "Estudio de Materiales y Técnicas de Realización Utilizadas en Obras de Arte y sus Procesos de Alteración", inició su actividad hace más de cuarenta años (1965) colaborando en estudios de arqueometría y en restauraciones de imágenes religiosas que procesionan por las calles de Sevilla. Desde entonces nuestros trabajos sobre obras de arte han sido continuados, se pueden citar más de un centenar de obras estudiadas que abarcan edificios, retablos, metales, cerámicas, rocas, esculturas, obras en lienzo, pinturas murales, espejos, fibras de papel, manuscritos, pigmentos, soportes, maderas, etc. El estudio ha abarcado no sólo la caracterización de estos materiales y la técnica utilizada para su realización, que es de gran importancia, sino del deterioro de los mismos, estudiando las causas y las formas de control. Desde el inicio de nuestro trabajo en este campo de investigación hemos tenido una evolución continuada en las técnicas de estudio, al mismo tiempo que hemos ido aumentando nuestros conocimientos en este campo. Los estudios han sido realizados con la colaboración de otros muchos expertos en Patrimonio Cultural de varias Instituciones y empresas privadas, además de las ayudas económicas de los proyectos a nivel nacional y europeo y principalmente a la colaboración con la Dirección General de Bienes Culturales de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. En los últimos años estamos avanzando en mejorar las técnicas y aplicar otras nuevas para el estudio del Patrimonio como la radiación sincrotrón y principalmente técnicas no destructivas, en que no se requiere la toma de muestras, como son difracción de rayos X utilizando cristales Göbel, difractómetro con ángulo rasante, desarrollo de equipos de difracción y microanálisis portátiles, espectroscopía Raman portátil y otras técnicas de medidas físicas.

1. INTRODUCCIÓN A LA ACTIVIDAD DEL GRUPO

La investigación del Patrimonio Cultural requiere la participación de científicos de distintas ramas del conocimiento. Esta afirmación motivó que nuestro grupo de investigación, inicialmente ubicado en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología y posteriormente en el Instituto de Ciencia de Materiales, entrase en contacto con historiadores del arte, restauradores, arquitectos, ingenieros y profesionales de otras ramas del conocimiento, para realizar estudios sobre el Patrimonio Cultural. Los contactos iniciales realizados con otros investigadores hace más de 40 años crearon un gran interés en nuestro grupo por el conocimiento de las obras de arte habiendo sido los responsables de una labor investigadora que ha ocupado y ocupan una parte importante de nuestro trabajo.

Nuestra labor se ha centrado en el estudio de las técnicas de realización de las obras de arte, así como en los procesos de alteración de los materiales que las constituyen. Se han realizado estudios sobre: esculturas (madera, metal y cerámica), pinturas (mural, caballete, policromía de las esculturas citadas), órganos, vidrios (espejos), libros (coros, manuscritos árabes), cerámicas, rocas (granitos, calcarenitas), etc. Para realizar estos estudios han sido necesarios adquirir conocimientos sobre la constitución de estos materiales y sus procesos de degradación, así como conocer y poner a punto las técnicas experimentales adecuadas para su caracterización.

La actividad a lo largo del tiempo se ha realizado gracias a las ayudas económicas prestadas por el Consejo Superior de Investigación Científicas, Universidad de Sevilla, Comunidad

Económica Europea, Ministerio de Educación y Ciencia, Dirección General de Bienes Culturales de la Junta de Andalucía, ayuda a grupos de la Junta de Andalucía y convenios con diversas empresas.

2. EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO

El grupo de investigación está constituido por los siguientes investigadores: José Luis Pérez Rodríguez, Dr. en Química, Profesor de Investigación del CSIC; Ángel Justo Erbez, Dr. en Química, Investigador Científico del CSIC; Juan Poyato Ferrera, Dr. en Química, Profesor Titular de la Universidad de Sevilla; Adrián Durán Benito, Dr. en Química, Becario Postdoctoral en los laboratorios "Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France"; María del Carmen Jiménez de Haro, Dra. en Química, Titulado Superior, CSIC; Liz Karen Herrera, Ingeniera de Materiales, Investigadora contratada Marie Curie, Belinda Sigüenza Lda. en Química, contratada con cargo a proyectos de investigación, Carlos Odriozola, Becario I3P del CSIC, María Luisa Franquelo Zoffmann, becaria del CSIC con cargo a proyecto. Entre los investigadores que formaron parte en años anteriores del grupo, merecen destacarse: Celia Maqueda Porras, Dra. en Química, Profesora de Investigación del CSIC; Esmeralda Morillo González, Dra. en Química, Investigadora Científica del CSIC; José María Martínez Blánez, Ldo. en Químicas, Titulado Medio del CSIC; Eduardo Gómez Asensio, Técnico en Microscopía Electrónica del CSIC.

La labor investigadora comenzó a finales de los años sesenta colaborando con profesores de la Universidad de Sevilla que solicitaban la caracterización de materiales encontrados en yacimientos arqueológicos, pinturas murales, o procedentes de imágenes religiosas que procesionan por las calles de Sevilla. Posteriormente se estableció una estrecha colaboración que aún perdura, con el Dr. Francisco Arquillo, Profesor de la Facultad de Bellas Artes de Sevilla, responsable principal de nuestro interés por el estudio del Patrimonio, destacando en estos primeros tiempos los estudios realizados sobre las pinturas murales de Daniel Vázquez Díaz del Monasterio de la Rábida (Huelva), a instancia del Ministerio de Cultura de aquel momento, y el del Retablo Mayor de la Catedral de Sevilla [1] (Figura 1). Desde entonces nuestro trabajo sobre obras de arte ha sido continuado.

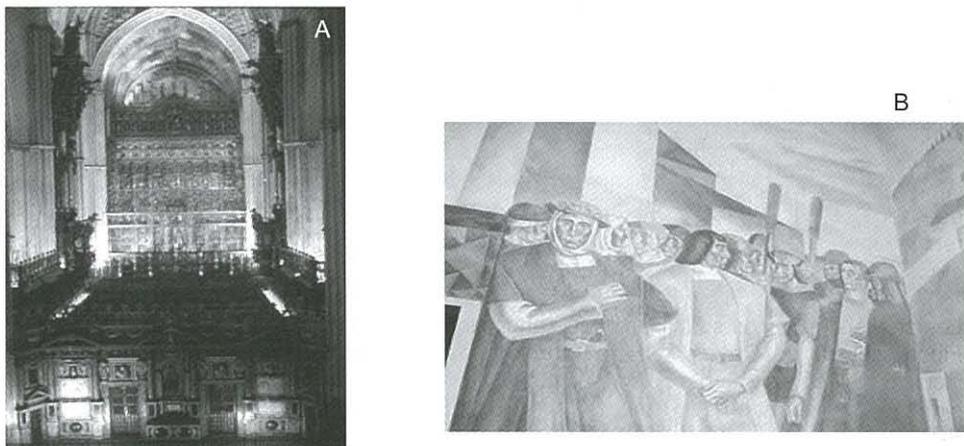


Figura 1. (A) Retablo mayor de la Catedral de Sevilla. (B) Pintura mural de Manuel Vázquez Díaz del Monasterio de la Rabida, Huelva.

A finales de los años setenta se establece una estrecha relación con el grupo de María de los Ángeles Vicente, Dra. en Químicas, Investigadora Científica del CSIC, en el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca. Esta importante colaboración, aún

perdura con los discípulos y compañeros de la Dra. Vicente que forman parte de la Unidad Asociada "Grupo Química del estado sólido" entre la Universidad de Salamanca y el IRNASA: con Vicente Rives, Profesor Titular, Adolfo Iñigo Iñigo, Dr. en Químicas, Científico Titular del CSIC; Jacinta García Talegón, Dra. en Geología, Contratada Ramón y Cajal, Eloy Molina, Dr. en Geología, Profesor Titular, Dr. Santiago Vicente Tavera, Dr. en Matemáticas, Profesor Titular, Hernando Herrero, Ldo. en Geología, Becario FPI. Con este grupo se han realizado varios proyectos de investigación (dos europeos, cuatro nacionales) y varios convenios de colaboración. En los últimos años, se ha establecido contactos con Dra. María Dolores Robador, catedrática de la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla y con el grupo de Investigación de Teresa Espejo, Dra. en Bellas Artes, Profesora Titular de la Universidad de Granada. Estos contactos han permitido participar en tres Proyectos de Investigación del Plan Nacional de Materiales. Estos proyectos han facilitado nuestros estudios en monumentos destacados, pudiéndose citar: El Alcázar y el Ayuntamiento de Sevilla, así como libros de coro [2] y manuscritos árabes [3].

En la labor docente de los miembros del grupo, relacionadas con el Patrimonio Histórico y Cultural, merecen destacarse los Master Europeos organizados en Sevilla durante los años 2004, 2005 y 2006 en colaboración con la Universidad de Sevilla. En los años 2007 y 2008 se colaborará en un Master sobre manuscritos árabes organizado por la Universidad de Granada.

Nuestra labor investigadora, durante los últimos quince años, ha sido en gran parte posible a la colaboración, mediante convenios y contratos, con la Dirección General de Bienes Culturales de la Junta de Andalucía, que ha permitido disponer de muestras y medios económicos para llevar a cabo estudios de obras de arte, y participar en grandes proyectos culturales de la Junta de Andalucía.

La colaboración, mediante convenios, con el Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico ha permitido estrechar nuestra participación en el estudio del Patrimonio Cultural.

Las relaciones con el Museo de Bellas Artes de Sevilla y especialmente con M^a del Valme Muñoz, Fuensanta de la Paz y Carmen Alvarez ha permitido el estudio de pinturas existentes en dicho museo.

El poner a punto las técnicas experimentales disponibles, a lo largo del tiempo dedicado a la investigación, para el estudio del Patrimonio han marcado la evolución del grupo. Nuestros comienzos, hace 40 años, utilizando cámaras *Debye-Scherrer* para caracterizar los pigmentos, fueron superándose hasta llegar al momento actual en que disponemos de difractómetros para estudios de superficies de muestras, o para poder trabajar con capilares que facilitan el estudio de cantidades muy pequeñas de muestras y de fibras. Más recientemente se han adquirido cristales *Göbel*, que permiten estudiar directamente las piezas de obras de arte (tamaño pequeño) sin necesidad de tomar muestras.

Los análisis químicos se iniciaron utilizando absorción atómica, disponiéndose más tarde de Fluorescencia de Rayos X y analizadores basados en Energía Dispersiva de Rayos X incorporados a los microscopios electrónicos, lo que facilitó la caracterización química de los pigmentos inorgánicos. Muy recientemente se dispone de un microscopio electrónico Hitachi S-4800 que ayudará a una mejor caracterización de los materiales que componen las obras de arte.

La caracterización mediante espectroscopía infrarroja de los primeros estudios, se mejoró, a principio de los años noventa, con la adquisición de un microscopio, acoplado al equipo de infrarrojos, que permite el estudio de los distintos estratos de la muestra. La reciente adquisición de un equipo de espectroscopía Raman ha facilitado la caracterización de pigmentos, aglutinantes y soportes de las pinturas. El disponer de equipos como

espectroscopia fotoelectrónica de rayos X, analizadores térmicos, etc. adquiridos en los últimos años han facilitado nuestro trabajo, así como la utilización de la radiación sincrotrón en grandes instalaciones (European Synchrotron Radiation Facility, Francia) para la realización de microdifracción, microfluorescencia *in situ* en los estratos pictóricos, absorción de rayos X y difracción de rayos X de alta resolución. Estos avances nos están permitiendo profundizar en el conocimiento de los materiales utilizados en el Patrimonio.

La colaboración con el Profesor Giuseppe Chiavari del Departamento de Química de la Universidad de Bolonia nos ha permitido el uso de la espectrometría de masas, cromatografía de gases y pirólisis analítica para la caracterización de los compuestos orgánicos de las muestras de Patrimonio.

El disponer de la instrumentación científica es de gran importancia, pero se requiere un conocimiento no sólo de la técnica sino también de la aplicación concreta y directa para el estudio de los materiales utilizados en el Patrimonio, como ocurre con los integrantes de este grupo de investigación.

3. PRINCIPALES CASOS ESTUDIADOS

Los muchos años dedicados a la investigación del Patrimonio han permitido el estudio de una amplia variedad de obras de arte. A continuación se exponen algunos ejemplos, agrupados por materiales

3.1. Cerámicas

La Catedral de Sevilla está considerada como uno de los monumentos más importantes de la cristiandad. Varios de sus pórticos están decorados con esculturas de cerámicas. Las figuras de los pórticos del Nacimiento y Bautismo fueron realizadas por Lorenzo Mercadante y por Pedro Millán, siendo de autor desconocido las de la Puerta del Perdón. En estos estudios [4-8] se caracterizaron los materiales y técnicas utilizados para su fabricación. Los materiales utilizados son similares a los empleados para la cerámica trianera, utilizándose dos temperaturas de cocción, una por debajo y otra por encima de 900°C. Las cerámicas de la Puerta del Perdón y la de los tímpanos de los otros dos pórticos estudiados estuvieron policromadas (Figura 2).

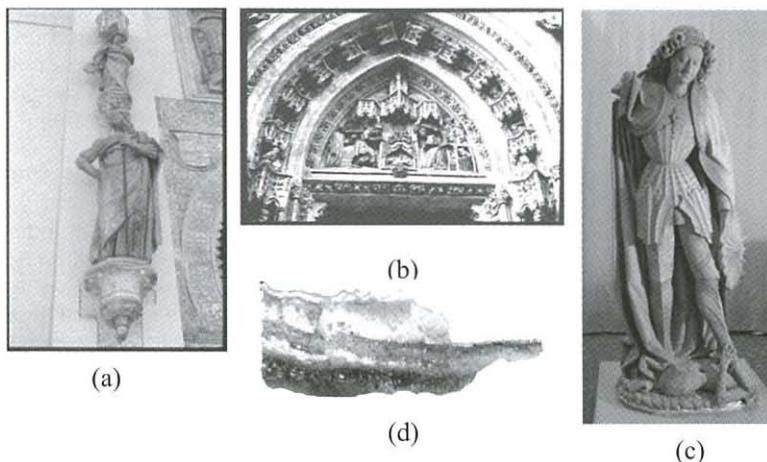


Figura 2. (a) Escultura de cerámica de La Puerta del Perdón de la Catedral de Sevilla. (b) Tímpano de la Puerta del Nacimiento de la Catedral de Sevilla. (c) Escultura de cerámica realizada por Lorenzo Mercadante de Bretaña. (d) Estratigrafía de la policromía de la cerámica del Tímpano.

Los pigmentos detectados en las láminas de pinturas pertenecen al grupo de minerales utilizados en la antigüedad. La contaminación ha alterado la superficie de la cerámica, destruyendo la policromía, permaneciendo en el momento del estudio pequeñas partes pintadas recubiertas de costras y suciedad. Los compuestos de plomo originales se alteraron a anglesita, cerusita, hidrocercusita y sulfuro de plomo. La azurita utilizada para realizar los colores azules se transformó en malaquita, de color verde. La atacamita se formó por la reacción de azurita con cloruros aportados por la contaminación ambiental. La contaminación ambiental ha aportado una variedad de compuestos orgánicos, principalmente alcanos (producidos por la combustión del petróleo), que son responsables de la costra negra y que contribuye al desarrollo microbiológico.

Por otra parte, se llevan a cabo estudios arqueológicos con el análisis territorial de la comarca de Tierra de Barros, Badajoz, viene mostrando una cierta identidad territorial para la zona que perdura desde el Neolítico hasta la Edad del Bronce. El objetivo del trabajo es intentar descifrar qué tipo de organización económica existía en la comarca en el tercer milenio, antes de nuestra era. A través del estudio de la tecnología de producción cerámica, en base a un exhaustivo estudio de las cadenas de producción (captación de recursos, producción, distribución y consumo) mediante el uso de técnicas físico químicas (XRD, XRF, FTIR, porosimetría de mercurio, análisis digital de imágenes de probetas pulidas de las secciones, colorimetría, etc.) para caracterizar la producciones de los más de 20 yacimientos muestreados en el territorio de Tierra de Barros [9]. Este análisis se complementa con el estudio de materiales muestreados de territorios vecinos como son la Meseta Norte o la orilla izquierda del Guadiana donde se han muestreado cinco yacimientos y donde de momento se ha podido ver una pauta técnica (rellenos de hueso) que describe el Territorio de Tierra de Barros en contraste con la Meseta, pero que comparten las dos orillas del Guadiana.

A su vez realizamos análisis de Termoluminiscencia y radiocarbono AMS para generar una secuencia cronológica que nos dé una idea de cómo las pautas de distribución cambian a lo largo del tiempo viendo así tanto la vida de los asentamientos como su implantación y los diferentes sistemas económicos de producción que han existido a lo largo de un milenio.

3.2. Metales

Nuestro grupo ha estudiado diferentes tipos de materiales metálicos [10], destacando sellos de plomo de la colección del Excmo. Ayuntamiento de Sevilla, los bronce de la Puerta del Perdón de la Mezquita de Córdoba, tubos metálicos de órganos de diferentes iglesias, metales encontrados en yacimientos arqueológicos, oro, plata y estaño utilizados en policromías, brocados, dorados, etc. La causa de alteración de estos materiales es muy variable.

El oro utilizado en policromías de la Catedral de Sevilla se ha perdido debido a la alteración del material empleado para adherir la lámina de oro a la cerámica y el estaño se ha transformado en romarchita (SnO) perdiéndose en un proceso similar al indicado para las láminas de oro [11].

En la degradación de los bronce estudiados, su alteración se debe a la formación de atacamita principalmente, destacando que en uno de los casos la limpieza inadecuada con algún producto que contenía cloro causó la alteración (Figura 3).

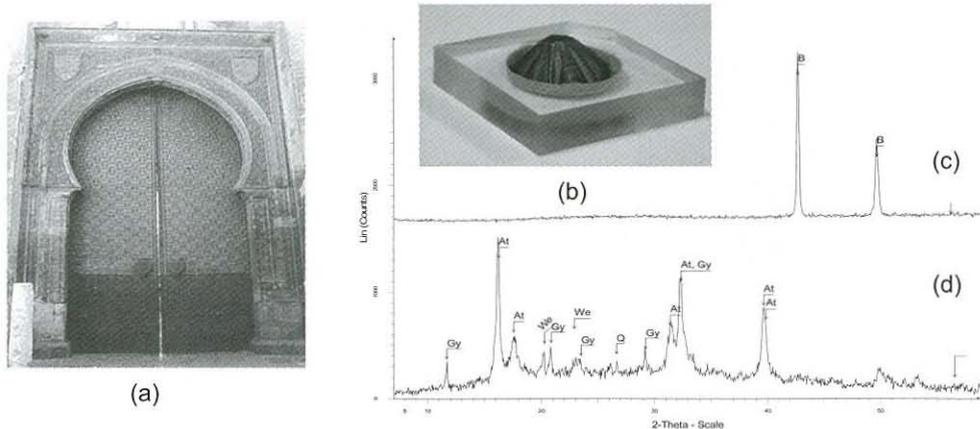


Figura 3. (a) Puerta del Perdón de la mezquita de Córdoba. (b) Montaje de remache de la puerta para su estudio por difracción de rayos X con cristales Göbel. (c) DRX del remache mostrando material inalterado B(Cu-Sn) y (d) la alteración superficial At (atacamita), We (weddellite), Gy (Yeso), Q (cuarzo).

La alteración más usual de la plata es el ennegrecimiento de la superficie debido a la interacción con compuestos orgánicos e inorgánicos que contienen azufre.

Destaca el estudio realizado sobre sellos de plomo, en que los resultados confirman la presencia de compuestos de carbonatos de plomo (cerusita e hidrocerusita), responsables de la herrumbre blanca y polvoriento detectada en la superficie de los mismos. La formación de estos compuestos se debe a la reacción entre el plomo y los ácidos orgánicos volátiles procedentes de la hidrólisis de la celulosa del cartón de los expositores y la de la madera de los muebles que lo contiene.

3.3. Espejos

Los espejos fueron realizados con una amalgama de estaño y mercurio, principalmente utilizada desde el siglo XVI hasta principios del siglo XX. El estudio se realizó sobre espejos del siglo XVII de la iglesia de Santo Domingo en Granda y de Baños de la Encina (Jaén). En estos estudios [12] se ha realizado un análisis cualitativo de las fases presentes en la amalgama utilizando la técnica de difracción de rayos X con ángulo rasante. Esta técnica permitió el conocimiento en profundidad de la muestra variando el ángulo de incidencia del haz de rayos X sobre la muestra. El análisis elemental se hizo empleando energía dispersiva de rayos X, y la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X permitió conocer la composición atómica y el estado de oxidación del estaño (Figura 4).

Los estudios demostraron que la amalgama está compuesta de una aleación binaria de estaño y mercurio. El mercurio se ha evaporado lentamente dejando partículas finas de estaño que se oxidan fácilmente. La alteración de la amalgama incrementa la velocidad del proceso de transporte del mercurio hacia el exterior.

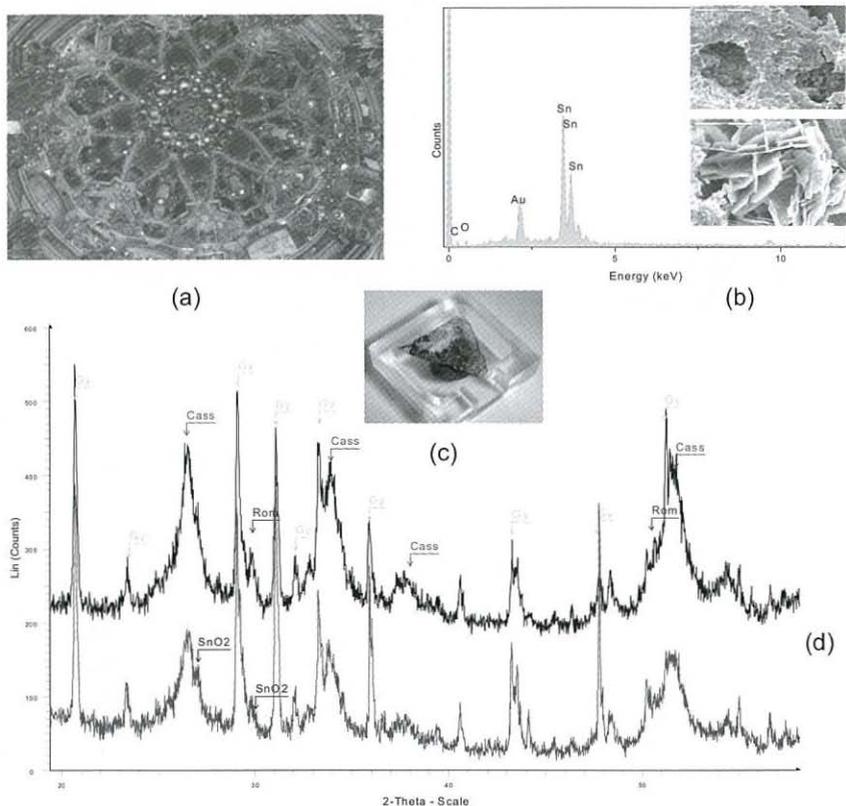


Figura 4. (a) Ornamentación del camarín de la Iglesia de Santo Domingo de Granada. (b) Imagen SEM por electrones retrodispersados de la morfología de los óxidos de estaño y su análisis elemental por EDX donde se observa oxígeno y estaño. (c) Portamuestras con fragmento del espejo para el estudio por difracción de rayos X utilizando ángulo rasante. (d) Difractograma en ángulo rasante de la capa reflectante del espejo utilizando ángulos de incidencia de 1° y $5^\circ(\theta)$.

3.4. Esculturas

Como ejemplo se citan tres obras de Martínez Montañés [13]: Inmaculada Concepción- “La Cieguecita”, San Pascual Bailón y San Francisco de Asís.

La capa preparatoria encontrada en las tres esculturas está formada por yeso (que viene a veces acompañada de impurezas como sulfato de estroncio, barita o tierras) y cola animal. Sólo en el caso de una muestra perteneciente a San Pascual Bailón, la composición principal era a base de tierras (Figura 5).

El autor añadía en algunos casos una capa de imprimación, formada por albayalde, calcita y aceite, con la intención de conseguir algún efecto cromático o como base intermedia que recibía la policromía. Por otra parte, en las estratigrafías analizadas aparecen una serie de efectos, como son las veladuras, estofados, rellenos con aglutinantes orgánicos, y sobre todo, los distintos repintes que han sufrido las obras a lo largo de los siglos (policromía original del siglo XVII y repintes posteriores).



Figura 5. Escultura de la Inmaculada Concepción "La Cieguecita", de Martínez Montañés.

En cuanto a los pigmentos detectados, se tienen distintas clases de pigmentos. Los blancos empleados han sido albayalde, calcita, dolomita, blanco de huesos, barita, blanco de titanio y óxido de zinc, los de color negro y marrón oscuro, carbón vegetal, tierra siena y negro de huesos. Los verdes empleados han sido tierra verde, malaquita y óxido de cromo. En los rojos se ha encontrado tierras (silicoaluminatos), bol rojo, carmín-cochinilla, hematites, cinabrio (bermellón) y minio, y en los azules, azurita, lapislázuli y azul orgánico (Tabla 1).

Tabla 1. Pigmentos de Martínez Montañés

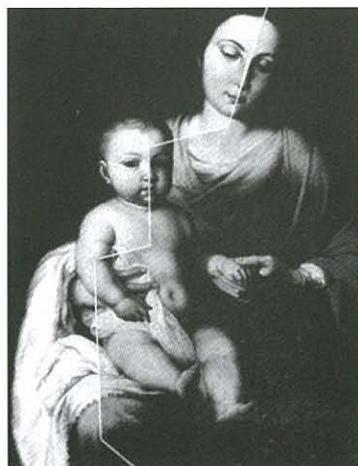
Colores	La Cieguecita	San Pascual Bailón	San Francisco de Asís
Verdes	Atacamita, tierra verde (silicoaluminatos), malaquita, óxidos de cromo		Tierra verde (silicoaluminatos)
Rojos	Tierras (silicoaluminatos), bol rojo, carmín-cochinilla, hematites, cinabrio, minio	Tierras (silicoaluminatos), bol rojo, hematites, cinabrio	Tierras (silicoaluminatos), bol rojo, carmín-cochinilla, hematites, cinabrio
Azules	Azurita, lapislázuli, azul orgánico	Azul orgánico	
Blancos	Albayalde, calcita y/o dolomita, barita, blanco de titanio, blanco de zinc	Albayalde, calcita y/o dolomita, blanco de huesos	Albayalde, calcita y/o dolomita
Negros y marrones oscuros	Carbón vegetal, tierra siena, negro de huesos	Carbón vegetal, tierra siena, negro de huesos	Carbón vegetal, tierra siena

Las capas de barniz son evidentes en algunas de las muestras, en algunos casos barniz limpio y en otras, barniz con acumulación de suciedad ambiental. También se puede concluir que la técnica pictórica empleada en todos los casos es óleo, ya que el aglutinante empleado es aceite.

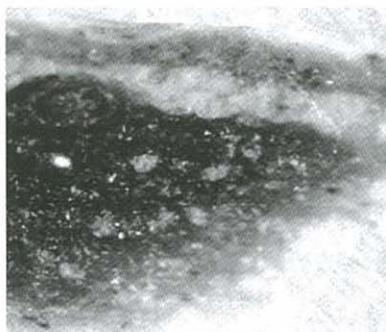
3.5. Obras en lienzo

Como ejemplo se citan pinturas de Murillo: Virgen con Niño, San José y el Niño y San Juan Bautista [13], Valdés Leal: Bautismo de San Jerónimo y José de Ribera: Santa Teresa de Jesús. Se estudiaron las fibras de tres de los lienzos pertenecientes a estas obras de arte. Los estudios espectroscópicos y microscópicos realizados en los tres casos demostraron que la fibra empleada fue lino.

En el caso de las obras de Murillo y de José de Ribera las capas de preparación estaban constituidas por silicatos (tierras) con poca proporción de calcita, yeso, compuestos oleosos y proteínicos. El yeso y la cola animal, además de algunas impurezas de silicatos, son los elementos que conforman la capa preparatoria de la obra *Bautismo de San Jerónimo* de Valdés Leal (Figura 6).



(a)



(b)

Figura 6. (a) Lienzo de la Virgen con Niño de Murillo. (b) Estratigrafía de la carnación de la pierna derecha del niño.

A veces, Murillo empleaba una capa de imprimación con la intención de obtener algún efecto cromático. Se han detectado colores azulados en estratos intermedios entre la capa de preparación y la capa de color; en los mismos se han encontrado nódulos de albayalde, carbón vegetal y esmalte (Tabla 2). En el caso de las muestras del lienzo de Valdés Leal (Tabla 3) resulta evidente el empleo de una capa de color negro en la capa de imprimación, a base de carbón vegetal, consiguiendo la sensación de oscuridad propia de las obras de dicho autor.

Tabla 2. Pigmentos de Murillo

Colores	Virgen con Niño	San José y el Niño	San Juan Bautista
Verdes		Malaquita	Tierra verde
Rojos	Cinabrio, tierras (silicoaluminatos con óxidos de hierro)	Tierras (silicoaluminatos con óxidos de hierro), carmín-cochinilla, minio	Cinabrio, tierras (silicoaluminatos con óxidos de hierro)
Azules	Esmalte	Esmalte	Esmalte
Blancos	Albayalde	Albayalde, calcita	
Negros y marrones oscuros	Negro de huesos	Negro de huesos, carbón vegetal	Negro de huesos, tierra siena

En cuanto a los pigmentos, la nota más distintiva es el empleo de esmalte fabricado a partir de glaucodot en muchos de los azules empleados por Murillo.

Se han detectado rojos de cinabrio, tierras (silicoaluminatos con óxidos de hierro), carmín-cochinilla, minio, bermellón; y verdes a base de tierra verde y malaquita. Los pigmentos azules detectados son esmalte y azurita, los negros y marrones, negro de huesos, carbón vegetal y tierra siena, y los blancos, albayalde y calcita.

Tabla 3. Pigmentos de Valdés Leal y José de Ribera

Colores	Bautismo de San Jerónimo	Santa Teresa de Jesús
Verdes	Malaquita	
Rojos	Cinabrio, tierra roja	Cinabrio, tierra roja
Azules	Azurita	
Blancos	Albayalde	Albayalde
Negros y marrones oscuros	Carbón vegetal	Carbón vegetal, tierra siena
Amarillos		Ocre amarillo

El medio aglutinante empleado en todas las obras es oleoso. Posiblemente el aceite usado en San José y el Niño, al igual que el empleado en Virgen con Niño, sea aceite de linaza. Hay ligeras variaciones en cuanto a las posiciones de las bandas de absorción en la tercera de las obras, San Juan Bautista, por lo que puede tratarse de algún otro tipo de aceite. En las obras de los otros autores, Valdés Leal y José de Ribera, se detecta que el aglutinante empleado es oleoso, aunque no se pueda asegurar con total certeza que se trate de aceite de linaza.

Las capas protectoras de barniz son evidentes en la mayoría de las muestras de las obras de Murillo. En algunas se observa un barniz muy limpio sin apenas restos de suciedad, y en otras un barniz con acumulación de suciedad. Sin embargo, las muestras de las obras de los otros dos autores no muestran en su mayoría unas capas de barniz limpias.

3.6. Pinturas Murales

3.6.1. Pintura parietal romana de Villa dei Papiri (Herculano) y del jardín de la casa del Bracciale d'Oro (Pompeya)

Nuestro campo de estudio se centró en muestras procedentes de Pompeya y Herculano, que son de una altísima calidad pictórica y que ofrecen un excelente estado de conservación. En las muestras estudiadas [14], se ha detectado la presencia de pigmentos como hematites, azul pompeyano, bermellón, tierra roja, negro de huesos, carbón vegetal y tierra verde. La capa superficial del mortero solo muestra la presencia de calcita; se trata por lo tanto de una técnica muy depurada.

La técnica pictórica empleada es la del buen fresco en los fondos monocromos y una segunda técnica *a secco* en zonas ornamentales y figuradas, en las que se han detectado compuestos de tipo proteínico.

3.6.2. Pintura mural estilo Mudéjar del estanque del Patio de las Doncellas de los Reales Alcázares de Sevilla

El estudio [15] demostró que en el siglo XIV uno de los estanques de los Reales alcázares estuvo recubierto con un mortero de cal finalizado con un dibujo geométrico mudéjar. Los pigmentos utilizados para las pinturas se realizaron empleando albero, para el color amarillo claro, óxidos de hierro y bermellón o cinabrio para los colores rojos. En el siglo XV este mortero fue picado para cubrirlo con otro mortero y pintado con dibujos de lazos. El pigmento utilizado para el color negro de esta pintura fue carbón obtenido del quemado de carbón animal. Los pigmentos para el color rojo fueron óxidos de hierro y bermellón o cinabrio (Figura 7).

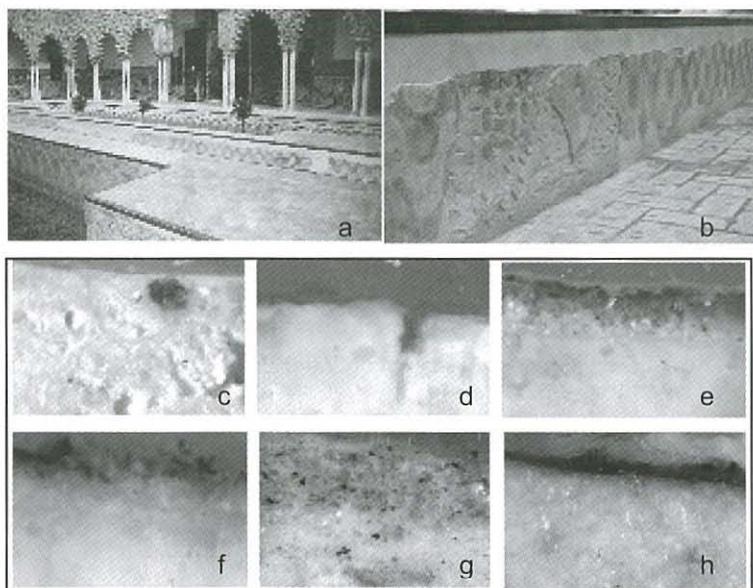


Figura 7. (a) Patio de las Doncellas de los Reales Alcázares de Sevilla. (b) Ornamentación de los siglos XIV y XV-XVI. (c-h) Diferentes estratos pictóricos encontrados en esta ornamentación.

3.6.3. Pinturas murales de la Cartuja y de la Iglesia del Salvador de Sevilla

En el estudio de las pinturas murales, hay que distinguir dos técnicas diferentes: *buen fresco* y *al seco*. En la mayoría de las muestras del Monasterio de la Cartuja apenas se observan restos de aglutinantes, salvo en algunos de los estratos más superficiales, y se observa calcita en todos los estratos, por lo que se concluye que en su realización se ha empleado una técnica *al buen fresco*. La mayoría de las muestras de la Iglesia del Salvador, tanto las del Retablo de la Nave del Evangelio y las de las Columnas de los Púlpitos, como las del Camarín de la Virgen de las Aguas, se tratan de unas policromías realizadas con técnicas *al seco*, ya que en las mismas se han detectado aglutinantes oleosos y proteínicos.

Se observa una mayor variedad de pigmentos en las muestras de la iglesia del Salvador (*seco*), que en las de la Cartuja (*buen fresco*) ya que la paleta de colores que se utiliza en las pinturas *al buen fresco* es mucho más restringida que en la utilizada en la pintura mural *al seco*, porque los pigmentos que se emplean en la pintura mural al fresco deben resistir la acción alcalina del agua de cal.

Se ha detectado la presencia de cinabrio, ocre rojo, malaquita, carbón vegetal, hematites, ocre amarillo, cochinilla, azul ultramar, azul orgánico, verde de París, tierra siena, litopón y barita.

3.7. Proyecto Andalucía Barroca

El proyecto Andalucía Barroca 2007, de la Dirección General de Bienes Culturales de la Junta de Andalucía de la Consejería de Cultura, ha incluido una serie de actuaciones sobre edificios, retablos y órganos barrocos del Patrimonio Histórico Andaluz.

Nuestro estudio, basado en la colaboración y ayuda económica de la mencionada Dirección General, abarca cuarenta obras del barroco andaluz localizadas en las ocho provincias de Andalucía. Merecen destacarse las siguientes obras:

Retablos de las iglesias de la Asunción de Huerca-Overa (Almería), iglesia de las Angustias de Ayamonte (Huelva), San Antonio Abad y San Benito de la iglesia de San Ildefonso de Jaén, iglesia de los Descalzos de Écija (Sevilla), iglesia de Santa María de la Oliva de Lebrija (Sevilla), iglesia de Santiago de Écija (Sevilla), colegiata de los Santos Justo y Pastor de Granada, Adoración de los Pastores de la iglesia de S. Pedro y S. Pablo de Puerto Moral (Huelva), ermita del Santo Cristo del Llano de Baños de la Encina (Jaén).

Esculturas del Cristo de la Paz, Virgen con el Niño coronada por los ángeles, Virgen Inmaculada, de la iglesia de Ntra. Sra. del Carmen de Antequera (Málaga) y Cristo de la iglesia de los Santos Justo y Pastor de Granada.

Pinturas sobre lienzo de la iglesia del Carmen de Antequera (Málaga), cuadros de P.A. Bocanegra de la iglesia de los Jesuitas de Granada, y Manifestador de la colegiata de los Santos Justo y Pastor de Granada.

Pintura Mural de la iglesia de San Agustín de Córdoba, de la ermita del Santo Cristo del Llano de Baños de la Encina (Jaén) y de la iglesia del Carmen de Antequera (Málaga).

Cajas de órgano de las colegiatas de Santa María del Alcázar y San Andrés de Baeza, y de los Santos Justo y Pastor de Granada, así como de las iglesias de San Hipólito de Córdoba y de los Descalzos de Écija (Sevilla) (Figura 8) [16].

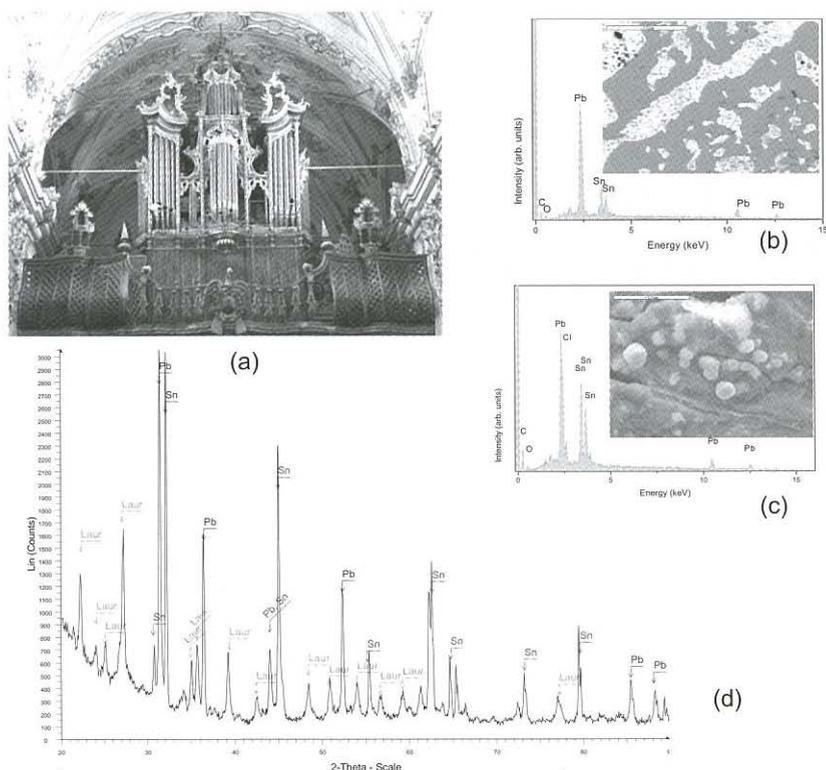


Figura 8. (a) Órgano Barroco de la Iglesia de Los Descalzos de Écija. (b) Imagen SEM por electrones retrodispersados de la aleación de los tubos y su análisis elemental por EDX donde se observa plomo y estaño. (c) Imagen SEM de una zona alterada de los tubos su análisis elemental por EDX donde se observa plomo, cloro y estaño. (d) Difractograma de una de las zonas alteradas de los tubos Pb (plomo), Sn (estaño), Laur (laurionita, PbOHCl).

3.8. Rocas

En colaboración con el Grupo de Química del Estado Sólido, Unidad Asociada del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (CSIC) y la Universidad de Salamanca, se han realizado proyectos de investigación y convenios para la conservación de materiales pétreos empleados en el Patrimonio Histórico y Cultural.

3.8.1. Catedral de Avila

En el proyecto de la Unión Europea STEP sobre la conservación de materiales graníticos en monumentos y el estudio de los factores y mecanismos de alteración para ser aplicados en conservación, coordinado por M.A. Vicente, participaron grupos de España, Francia y Portugal. Entre los monumentos piloto estudiados por los grupos españoles, se encuentra la catedral de Ávila (s. XII-XIII), que constituye uno de los edificios clave del protogótico y muestra un doble aspecto de templo y fortaleza. En esta se emplearon tres tipos de materiales pétreos: granito gris Ávila, piedra sangrante (granito silicificado rojo y blanco), y ocre (granito silicificado ocre) (Figura 9). La naturaleza fisicoquímica y mineralógica de los materiales pétreos, la presencia entre sus componentes de especies de gran reactividad (ópalo, kaolinitas, smectitas, etc.) y la naturaleza química de sus propiedades superficiales hace que estos materiales se comporten de formas muy distintas y a veces contradictorias, según las especies minerales que pueden ser generadas en su evolución, o bien en función de las condiciones ambientales a que han sido sometidas [17-20].

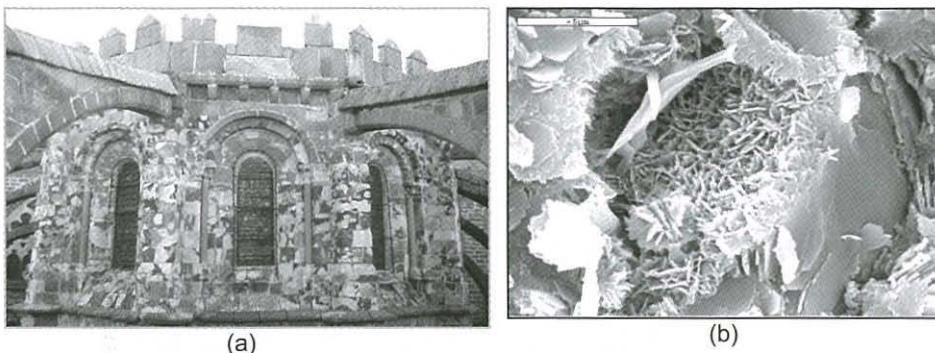


Figura 9. (a) Catedral de Avila. Girola en piedra sangrante. Arbotantes, almenas y columnas de la Girola en ocre y gris Ávila. (b) Microfotografía al MEB de piedra sangrante con ópalo CT y kaolinita.

3.8.2. Tratamientos de conservación en materiales pétreos

En el proyecto del Ministerio MAT2000-0972-C02, se llevó a cabo el estudio de procesos fisicoquímicos implicados en los tratamientos de conservación de rocas. Se eligieron cinco variedades, utilizadas en el Patrimonio Histórico de Castilla y León: granito de Ledesma (Salamanca), granito silicificado ocre de Avila, arenisca silicificada de Zamora, arenisca de Villamayor (Salamanca) y piedra de Campaspero (Valladolid). Se utilizaron tres tratamientos de conservación: RC70; RC80 y H224 (Figura 10). Todas las muestras tratadas se envejecieron artificialmente por hielo/deshielo, para evaluar su durabilidad. Con el fin de medir los efectos que produjeron los tratamientos y envejecimiento se realizaron análisis estadístico ANOVA con los resultados de resistencia al agua, color y ultrasonidos antes y después del tratamiento y/o del envejecimiento [21-23].

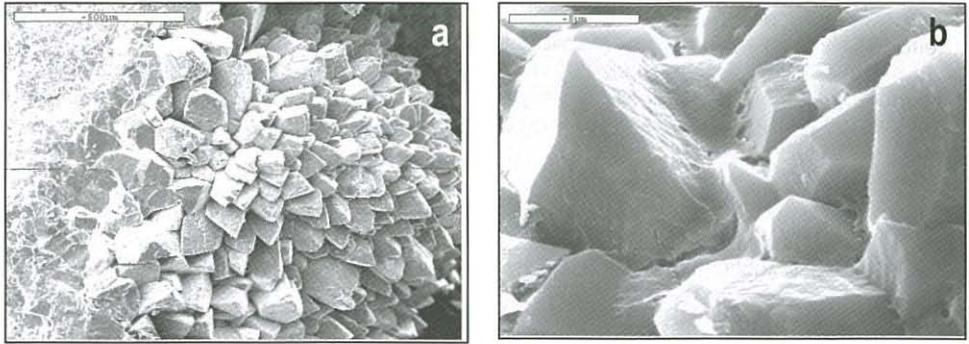


Figura 10. Microfotografías al MEB de la caliza de Campaspero antes y después del tratamiento de conservación. (a) Cristales de calcita no tratada. (b) Adherencia del tratamiento a la superficie de los cristales de calcita.

3.8.3. Iglesia del Salvador de Sevilla

A través del convenio con el Arzobispado de Sevilla, se está llevando a cabo el estudio de conservación de la piedra que se ha utilizado parcialmente en la estructura de la Iglesia del Salvador, tanto en interior como exterior del monumento. Se realizaron la caracterización petrofísica de las variedades de calcarenitas empleadas en el monumento, identificando las canteras históricas de las calcarenitas, los tipos de patologías en los distintos microambientes del edificio y los mecanismos y factores que las originaron, así como la eficacia y durabilidad de diferentes tratamientos de conservación en el laboratorio [24] (Figura 11).

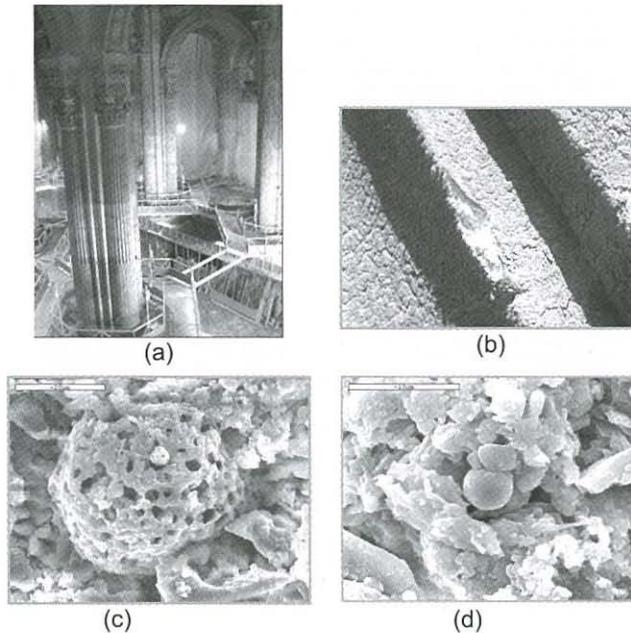


Figura 11. (a) Restauración de la Iglesia del Salvador de Sevilla. (b) Costra negra en la calcarenita del arbotante exterior de la Iglesia del Salvador. (c) y (d) Microfotografías al MEB de dos partículas en la costra negra en la calcarenita del arbotante.

3.9. Estudio del soporte y ornamentación de la bóveda de la Sala Capitular y de la escalera del Ayuntamiento de Sevilla

Se estudiaron en profundidad tanto el soporte como los morteros y las capas de preparación y de policromía y se identificaron posibles restos orgánicos hallados tanto en la composición de los elementos arquitectónicos de la bóveda de la Sala Capitular como de la escalera del Ayuntamiento de Sevilla (Figura 12). Para ello se realizaron diversas tomas de muestras en distintos estadios de su intervención, a medida que se producían nuevos hallazgos, y otros estratos y materiales iban quedando al descubierto, siendo el objetivo de este estudio la caracterización química y mineralógica de materiales tan diversos como la piedra, mortero y pigmentos e identificación de posibles aglutinantes y filmógenos de naturaleza orgánica.

Los resultados obtenidos muestran un dorado aplicado sobre una capa de bol, depositado a su vez sobre un estrato de blanco de plomo en un soporte de calcita. Posteriormente, la bóveda fue dorada de nuevo empleando una técnica similar, probablemente debido a alteraciones en el dorado primitivo. Por último, en el siglo XIX, todo el techo, salvo las partes descritas, fue blanqueado empleando una mezcla de calcita y blanco de plomo. El mortero fue elaborado con limo y dolomita en algunas zonas y calcita en otras. Los altorrelieves estaban asimismo dorados. La piedra de los muros de la escalera es de tipo calcáreo y presenta pequeños restos muy tenues de policromía constituida por ocre, y costras de yeso superficiales. En cuanto a los componentes orgánicos presentes, se han identificado restos proteicos fundamentalmente, así como algún resto oleoso en los muros de la escalera. El estuco de la bóveda de la Sala Capitular parece estar revestido de compuestos oleorresinosos y céreos. La caracterización de los materiales originales y añadidos con posterioridad en la ornamentación ha ido señalando el empleo de materiales a lo largo del proceso de restauración de este edificio histórico.

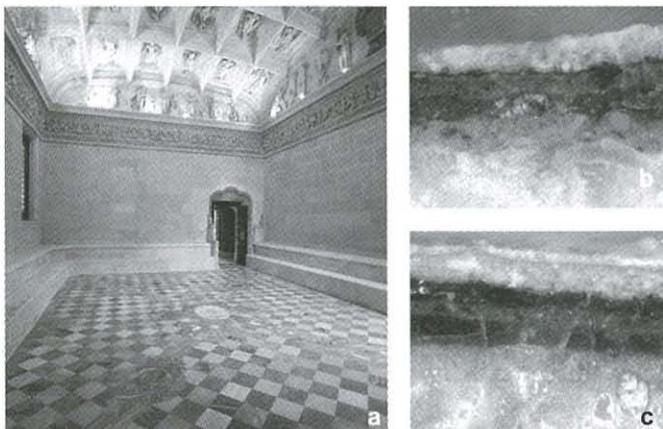


Figura 12. (a) Bóveda de la Sala Capitular del Ayuntamiento de Sevilla. (b) Estratigrafía dorada de la bóveda. (c) Inscripciones de color negro presentes en la decoración del techo.

4. PERSPECTIVAS DE FUTURO

Nuestras perspectivas de futuro están relacionadas con el conocimiento de las técnicas utilizadas para la realización de las obras de arte, para ello se caracterizarán los materiales empleados y los procesos de alteración.

Además de profundizar en las técnicas de caracterización de los materiales y en el conocimiento de las obras de arte se incorporarán nuevas técnicas de estudio, en algunas de las cuales ya tenemos una experiencia previa, como la radiación sincrotrón, la difracción

de rayos utilizando cristales *Göbel*, la espectroscopía Raman, utilizando equipos micro y portátiles, la espectroscopía fotoelectrónica de rayos X y la cromatografía de gases-espectrometría de masas y pirólisis analítica.

A continuación se exponen los proyectos de investigación que se comenzarán en los primeros meses del año 2008 con una duración trianual.

4.1. Estudio de órganos

Este estudio se realizará en los próximos tres años dentro del Plan Nacional de Materiales subvencionado por la Dirección General de Investigación de la Subdirección General de Proyectos de Investigación, Ministerio de Educación y Ciencia.

El principal objetivo del proyecto es conocer la composición y microestructura de las aleaciones estaño-plomo de tubos de órganos históricos españoles y sus productos de corrosión. Dicho objetivo persigue conocer los factores que afectan a dicha corrosión, como el efecto de los compuestos volátiles desprendidos de las maderas y otros materiales orgánicos utilizados en la construcción de órganos, vapor de agua y anhídrido carbónico.

Los trabajos se realizarán en materiales con diferentes grados de corrosión tomados en los propios instrumentos incluyendo principalmente aleaciones y maderas.

Se prepararán aleaciones con distintas proporciones estaño-plomo y trazas de otros elementos (As, Bi) y enfriadas a velocidades diferentes. Estas aleaciones se someterán a ensayos de corrosión acelerada y se estudiará la influencia de la composición y velocidad de enfriamiento en el proceso.

Se compararán los resultados obtenidos en el laboratorio con las muestras procedentes de los órganos y se extraerán conclusiones acerca de las posibles causas de alteración, las composiciones idóneas para las restauraciones y las aleaciones más resistentes a la corrosión para aplicarlas a la construcción de órganos nuevos.

4.2. Estudios en colaboración con la Dirección General de Bienes Culturales

Durante los últimos quince años se ha mantenido una estrecha relación con esta Dirección General en que se han realizado estudios encaminados al conocimiento científico de la obra previa a la intervención. Esta estrecha colaboración se espera se mantenga en los próximos años.

4.3. Estudio de la talla policromada Nuestra Señora Santa Ana de Dos Hermanas (Sevilla)

Se abordará un exhaustivo estudio, en conjunción con la Facultad de Bellas Artes y bajo los auspicios de la Hermandad de Nuestra Señora Santa Ana de Dos Hermanas, de la talla triple sedente de Santa Ana, la Virgen y el Niño, muy escasa en la iconografía religiosa. Se caracterizarán la madera soporte, diversas capas de preparación y policromía, tanto originales como las debidas a intervenciones posteriores, y se identificarán asimismo los aglutinantes y filmógenos de naturaleza orgánica empleados en los sucesivos estratos. (Figura 13). Se procederá, asimismo, a la datación de la madera soporte mediante la técnica de radiocarbono.



Figura 13. (a) Talla policromada de Nuestra Señora Santa Ana de Dos Hermanas Sevilla. (b) Estratigrafía de la túnica azul de la virgen donde se observan dos capas de policromía azul, la inferior a base de blanco de cinc y blanco de titanio, coloreado con lazurita y el estrato superior a base de azul ultramar, detectándose en la zona superficial un pigmento verde de cromo y un silicato magnésico, probablemente talco. (c) Sobre la policromía verde original (resinato de cobre) se observan diversos estratos de color blanco y de carnaduras correspondientes a intervenciones posteriores, las primeras conteniendo albayalde, bermellón, hematitas y laca roja y las más recientes blanco de titanio y blanco de cinc y con aglutinante oleoso.

4.4. Caracterización de materiales del Patrimonio Cultural mediante el uso radiación Sincrotron y técnicas no destructivas

La radiación sincrotrón asociada a las técnicas de DRX y FRX proporciona un buen número de ventajas en relación a las técnicas convencionales [25]. La técnica de microdifracción (SR- μ DRX) y microfluorescencia (SR- μ FRX) permiten realizar el análisis de muestras en regiones de $15 \times 15 \mu\text{m}$, lo cual es muy importante ya que se pueden identificar estrato a estrato los diferentes pigmentos inorgánicos presentes (Figura 14).

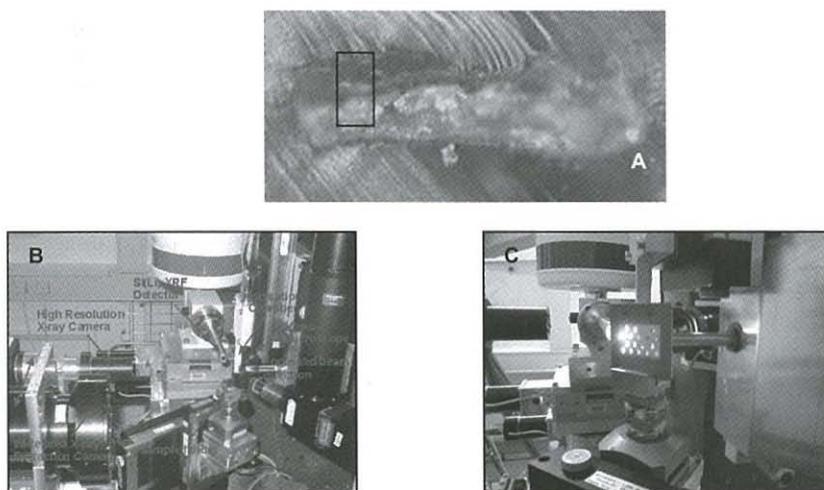


Figura 14. (a) Microestratigrafía donde se indica el área de análisis. (b) Equipo utilizado para el estudio de las muestras *beamline 18F*. (c) Portamuestras diseñado para el estudio de las micromuestras mediante SR- μ XRD.

Las muestras se prepararán en secciones transversales muy delgadas haciendo uso del microtomo para obtener espesores de 20-30 μm , de tal manera que las experiencias tanto de fluorescencia como de difracción en el sincrotrón se puedan realizar por transmisión. Se está implantando una nueva metodología para el estudio de micro-estratigrafías en el ESRF (European Synchrotron Radiation Facility), para la obtención de información mediante la aplicación de μDRX y μXRF a muestras con capas pictóricas micrométricas constituidas por mezcla heterogénea de pigmentos.

En cuanto al estudio de metales asociados al Patrimonio Cultural se realizarán análisis cualitativo de las fases cristalinas presentes en la superficie de amalgama de espejos y órganos barrocos haciendo uso de la radiación sincrotrón con la técnica de difracción de rayos X con ángulo rasante. Ello permite realizar un análisis de las diferentes fases en profundidad dependiendo de la variación del ángulo de incidencia con respecto a la microzona de la muestra seleccionada, permitiendo realizar un estudio no destructivo de la muestra y con la ventaja de poder analizar zonas muy puntuales deterioradas.

Se profundizará en la aplicación de técnicas no destructivas no requiriéndose la toma de muestras, como difracción de rayos X usando cristales *Göbel* (de la que existe una experiencia previa), equipos de difracción de rayos X y microanálisis por fluorescencia portátiles, espectroscopía Raman portátil y otros aparatos de medidas físicas.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Bienes Culturales de la Junta de Andalucía que nos facilitó la posibilidad de disponer de muestras de obras de arte y nos ha concedido ayudas económicas para la realización de gran parte de nuestra labor investigadora. Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas por habernos dado la posibilidad de dedicar nuestro trabajo de investigación a este campo, y las ayudas económicas a proyectos de investigación por parte de la Comisión Europea, Ministerio de Educación y Ciencia y Junta de Andalucía. A Rafael Pérez- Maqueda por la gestión y labor administrativa que realiza en los proyectos de investigación que llevamos a cabo.

6. REFERENCIAS

[1] Pérez-Rodríguez, J.L., Maqueda, C. y Justo, A. (1990): Das holzretaber der grossen kapelle im Dom zu Sevilla. Eine naturwissenschaftliche untersuchung. *Restaura* 4: 257-261.

[2] Bueno-Vargas, J., Espejo-Arias, T., Pérez-Rodríguez, J.L. y Justo-Erbez, A. (2006): Colour in the seventeenth century miniatures of spanish chair books. *Restaurator* 27: 143-161.

[3] Espejo, T., López-Montes, A., Durán, A., García, A. y Blanc, R. (2008): A study on colour in the collection of Arabic manuscripts in the Sacromonte Abbey, Granada, Spain. *Restaurator* (en prensa).

[4] Pérez-Rodríguez, J.L., Maqueda, C., Jiménez de Haro, M.C. y Rodríguez-Rubio, P. (1998): Effect of pollution on polychromed ceramic statues. *Atmospheric Environment* 32: 993-998.

[5] Pérez-Rodríguez, J.L., Maqueda, C. y Justo, A. (1985): A scientific study of the terracotta sculptures from the porticos of Seville Cathedral. *Studies in Conservation* 30: 31-38.

[6] Pérez-Rodríguez, J.L., Jiménez de Haro, M.C. y Maqueda, C. (2004): Isolation and characterization of barium sulphate and titanium oxides in monument crusts. *Analytica Chimica Acta* 524: 373-377.

[7] Pérez-Rodríguez, J.L., Maqueda, C., Justo, A., Morillo, E. y Jiménez de Haro M.C. (1994): Characterization of decayed ceramic sculptures decorating the Perdon portico of Seville cathedral, Spain. *Applied Clay Science* 9: 211-223.

- [8] Maqueda, C., Pérez-Rodríguez, J.L. y Justo, A. (1985): Degradation of ceramic sculptures on the Cathedral of Seville. *Mineralogica Petrographica Acta* 29: 591-598.
- [9] Odriozola, C. y Martínez-Blanes, J.M. (2007): Estimate of firing temperatures through bone-based chalcolithic decorated pottery. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 87: 135-14.
- [10] Durán, A., Pérez-Rodríguez, J.L., Herrera, L.K, Jiménez de Haro, M.C., Robador, M.D., Justo A., Blanes, J.M. y Pérez-Ferrer. J.C. (2007): Copper alloys deterioration due to anthropogenic action. *Metalurgia* (en prensa).
- [11] Durán, A., Pérez-Rodríguez, J.L., Jiménez de Haro, M.C., Herrera, L.K. y Justo, A. (2008): Degradation of gold and false golds used as gildings in the Cultural Heritage of Andalusia, Spain. *Journal of Cultural Heritage* (en prensa).
- [12] Herrera, L.K., Duran, A., Jimenez de Haro, M.C., Justo, A. y Perez-Rodriguez, J.L. (2007): Compositional depth profiling of amalgam of ancient Spanish mirrors by grazing-incidence X-ray diffraction. *Proceedings Non-destructive and Microanalytical Technique in Art and Cultural Heritage Research. Lisboa*. 1: 24-25.
- [13] Duran, A. (2006): *Metodología de estudio y análisis de diferentes tipos de obras de arte pertenecientes a la escuela Sevillana de los siglos XVII y XVIII*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.
- [14] Durán, A., Millán Sañudo, E., Jiménez de Haro, M.C., Cárceles Pascual, J.F., Justo Erbez, A. y Pérez-Rodríguez, J.L. (2008): Estudio técnico de la pintura parietal romana. Análisis de fragmentos provenientes de la Villa dei Papiri (Herculano) y del Jardín de la Casa del Bracciale d'Oro (Pompeya). *VII Congreso Ibérico de Arqueometría*. Instituto de Historia (CSIC), Museo Arqueológico Nacional y SaPaC (en prensa).
- [15] Duran, A., Herrera, L.K., Robador, M.D., Pérez-Rodríguez, J.L. (2007): Color study of mudejar paintings of the pond found in the palace of Reales Alcazares in Sevilla. *Color Research and Application* 32: 489-495
- [16] Justo Erbez, A., Martínez Blanes, J.M., Cea Galán, A., Pérez Rodríguez, J.L. y Jiménez Roca, E. (2001): Estudio científico de los tubos sonoros de metal del órgano Francisco Pérez de Valladolid (s. XVIII), Alcalá de los Gazules (Cádiz). En B. Gómez, M.A. Respaldiza. y M.L. Pardo (eds.) *III Congreso Nacional de Arqueometría*: 571-578. Sevilla: Universidad de Sevilla / Fundación El Monte.
- [17] García-Talegón, J., Molina, E. y Vicente, M.A., (1994): Nature and characteristics of 1:1 phyllosilicates from weathered granite, Central Spain. *Clay Minerals* 29: 727-734.
- [18] García-Talegón, J., Iñigo, A.C., Molina, E., Pérez-Rodríguez, J.L., Vargas, M. y Vicente, M.A. (1994): Granitos empleados en Avila. I Composición química de las distintas variedades. *Materiales de Construcción* 44: 23-28.
- [19] García-Talegón, J., Molina, E., Vicente, M.A. y Pérez-Rodríguez J.L. (1999): Decay of granite monuments due to salt crystallization in a non-polluted urban environment. *Materiales de Construcción* 49: 17-27.
- [20] Iñigo, A.C., García-Talegón, J., Molina, E., Pérez-Rodríguez, J.L., Vargas, M. y Vicente, M.A. (1994): Granitos empleados en Avila. II Caracteres petrofísicos. *Materiales de Construcción* 44: 28-37.
- [21] García-Talegón, J., Iñigo, A.C., Molina, E. y Rives, V. (2004): Efficiency and durability of conservation treatments in siliceous and limestone rocks in non polluted environments (Spain). En *32nd International Geological Congress, Florence (Italia)*.
- [22] Iñigo, A.C., Vicente-Tavera, S. y Rives, V. (2004): MANOVA-BIPLLOT statistical analysis of the effect of artificial ageing (freezing/thawing) on the colour of treated granite stones. *Color Research and Application* 29: 115-120.
- [23] Rives, V. y García-Talegón, J. (2006): Decay and conservation of building stones on cultural heritage monuments. *Materials Science Forum*, Vols 514-516: 1689-1694, Part 1-2.

- [24] Herrero-Fernández, H., García-Talegón, J., Justo, A., Iñigo, A.C., Molina, E., Alonso-Gavilán, G., Durán, A., y Pérez-Rodríguez, J.L. (2006): Natural calcareous sandstones resources for conservation of El Salvador Church (Seville, Spain). En *Proceedings of European Geological Union, Viena (Austria)*.
- [25] Herrera, L.K., Cotte, M., Jimenez de Haro, M.C., Duran, A., Justo, A. y Perez-Rodriguez, J.L. (2008): Characterization of iron oxides pigments by means of micro X-Ray diffraction experiments. *Applied Clay Science* (en prensa).

MORTEROS EN EL PATRIMONIO: CONSERVACIÓN Y REPARACIÓN

S. Martínez-Ramírez, F. Puertas, A. Palomo y M.T. Blanco-Varela

Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano Galvache, 4
28033 Madrid

Resumen. El grupo de investigación “Ciencia de Materiales aplicada al Patrimonio Cultural” inició sus actividades hace 20 años con su inclusión en el proyecto EURO CARE a finales de la década de los 80. En este tiempo han participado en diversos proyectos de investigación aplicando su formación científica en Ciencia de Materiales a la caracterización y diagnóstico del estado de conservación de edificios del Patrimonio Histórico construido y de sus materiales. Se ha prestado especial dedicación a conocer las causas y mecanismos de deterioro de materiales artificiales de construcción, y a diseñar y validar metodologías de estudio que permitieran alcanzar dichos objetivos, así como al diseño de nuevos materiales de reparación y de protección de morteros y hormigones.

1. INTRODUCCIÓN

A finales de los años 80 el grupo comenzó su andadura en la investigación relacionada con la conservación del Patrimonio Histórico Cultural, mediante su participación en el programa EURO CARE.

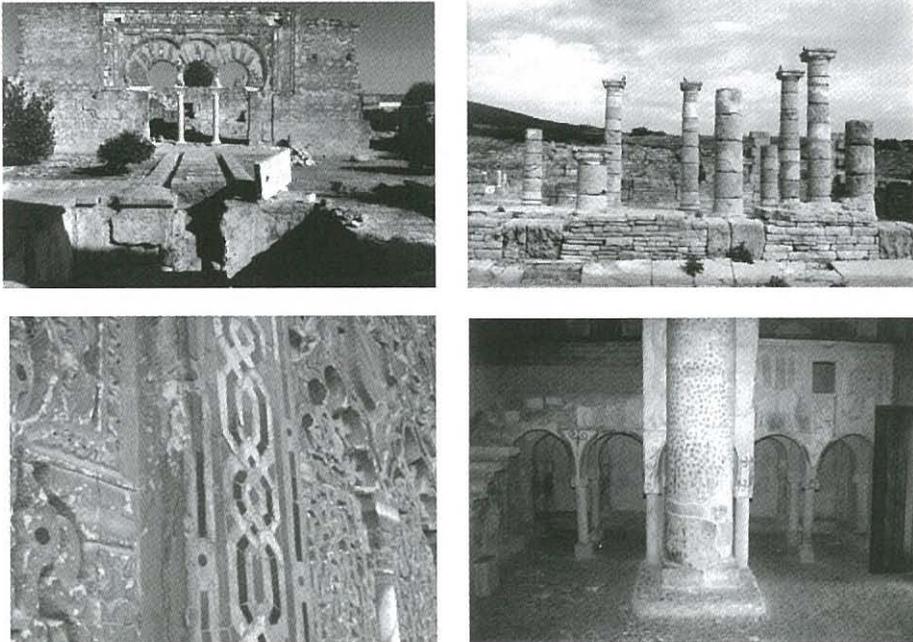


Figura 1. Morteros deteriorados en Medina Azahara, Baelo Claudia, Palacio del Rey D. Pedro en el Alcazar de Sevilla y San Baudelio de Berlanga.

Desde entonces hasta la actualidad se han cultivado distintas líneas de investigación, desde el desarrollo de técnicas de análisis no destructivo basadas en Termografía IR para el estudio de humedades en el Patrimonio, la propuesta y validación de una metodología de diagnóstico de humedades, que permite diferenciar el tipo de humedad presente en un edificio, y dar soluciones constructivas adecuadas a cada caso, pasando por el desarrollo de morteros de reparación, desarrollo de productos y valoración de tratamientos hidrofugantes o antivandálicos, por el estudio de la interacción de contaminantes atmosféricos con los materiales de construcción, o por el diagnóstico del estado de conservación de distintos materiales artificiales de construcción en diversos conjuntos arqueológicos, cuevas, edificios, etc.

Todos estos trabajos se han desarrollado en el marco de 14 proyectos de investigación financiados por CICYT o CE o por diferentes convenios con entidades públicas y privadas entre los que cabe destacar los alcanzados con la Consejería de Cultura de la Junta de Castilla y León para realizar trabajos de investigación en una veintena de monumentos y con la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía mediante el que se estudiaron 4 conjuntos arqueológicos y 8 cuevas con pinturas rupestres. Destacar también los trabajos llevados a cabo en las catedrales de Toledo y Sevilla, en la Torre del Oro, en el Alcazar de Sevilla y en el Palacio de La Granja de Segovia.

Dada la diversidad de líneas cultivadas se han seleccionado para su presentación aquí algunos de nuestros resultados más interesantes en torno a la conservación y reparación de morteros en el Patrimonio construido.

Los morteros, son materiales de construcción cuyos principales componentes son el ligante, el árido y el agua. En algunos casos y con el fin de mejorar sus propiedades se le añaden diferentes adiciones minerales (puzolanas, materiales cerámicos, etc.) o aditivos. Los morteros se emplean con una doble función: a) como revestimiento de superficies débiles tales como columnas, paredes, etc.; b) como material de unión, ya sea entre ladrillos, sillares, etc.

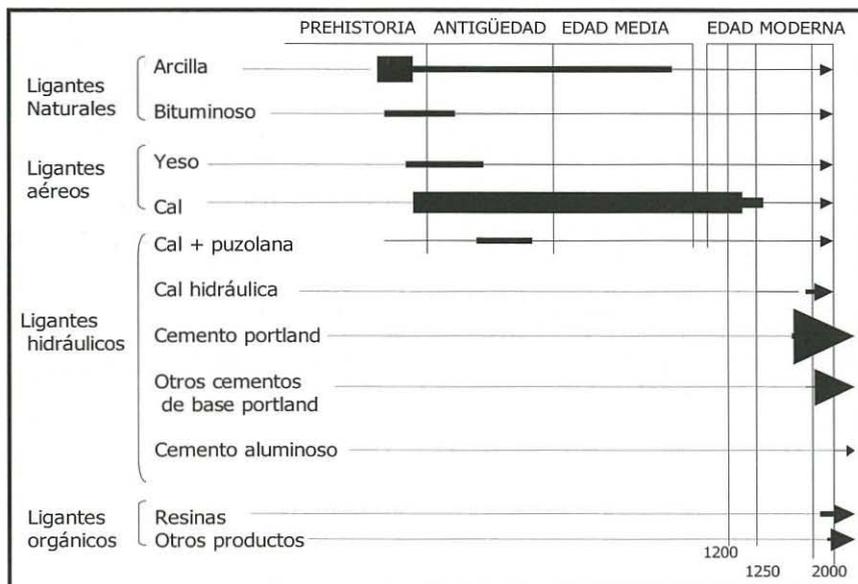


Figura 2. Evolución del uso de los conglomerantes a lo largo de la historia.

Las propiedades y características de los morteros dependen fundamentalmente de la naturaleza del ligante, por ello, su evolución en el tiempo ha estado muy estrechamente relacionada con el descubrimiento y desarrollo de conglomerantes artificiales. En la Figura 2 se muestra la evolución de diversos conglomerantes a lo largo de la historia [1].

Tal y como se muestra en la Figura 2, la arcilla, pero sobre todo la cal ya sea en forma de cal aérea, de cal y puzolana, o ya en el siglo XVIII como cal hidráulica, han sido los ligantes que más se han usado, formando parte de morteros u hormigones, a lo largo de la historia.

Los morteros forman parte del Patrimonio construido, como cualquiera de los otros materiales de construcción sufren alteraciones bien sea por encontrarse a la intemperie, o por las distintas condiciones de uso y han de conservarse, repararse, etc. Al plantearse la conservación o reparación de morteros del patrimonio histórico deben utilizarse materiales y métodos lo más parecidos posibles a los que se van a reparar, por lo que surgen problemas específicos que han de ser abordados, tal como identificar el ligante usado en su elaboración, características del material a reparar, características del material de reparación, compatibilidad con los materiales adyacentes, protección de las nuevas superficies, etc. A continuación se exponen algunos de los estudios realizados por el grupo para tratar de responder con base científica a algunas de estas cuestiones.

2. PROCEDIMIENTO DE IDENTIFICACIÓN DEL LIGANTE EN MORTEROS DEL PATRIMONIO

A finales de los años 90 participamos en un proyecto europeo [2] en el que desarrollamos y validamos un procedimiento de análisis que permite identificar y diferenciar los distintos conglomerantes hidráulicos presentes en morteros históricos [3]. Posteriormente y teniendo en cuenta la bibliografía este procedimiento se completó diferenciando también los morteros de cal aérea [4]. En la Figura 3 se muestra un esquema del procedimiento.

La metodología se basa en hacer una primera inspección visual seguida de un estudio por microscopía óptica en el que se identifican los áridos de los morteros y si el ligante es de naturaleza caliza o no lo es.

Si la matriz ligante es caliza hemos de buscar minerales traza característicos de puzolanas naturales bien por microscopía o difracción de rayos X.

Si la identificación ofrece dudas se someterá la muestra a un ensayo de puzolanicidad específicamente diseñado para ello. Si la matriz no es caliza se buscarán trazas de minerales de cal hidráulica o cementos, por microscopía óptica de luz reflejada. Finalmente se confirmarán los resultados por DRX y una serie de análisis químicos selectivos.

La validación del procedimiento se llevó a cabo con muestras tomadas del acueducto de Minturnae (siglo I antes de Cristo) cerca de Latina (Italia) y el de Claudio (año 52 después de Cristo) en Roma, Morteros de la Iglesia de Saint Michele en Lovaina (siglo XVII, restaurada en el siglo XIX), de enfoscados de la *Cité Moderne* en Bruselas (1920-1930), de la Iglesia de Santa María del Pilar en Valladolid, de un edificio (calle Manuel de Falla de Barcelona) (siglo XX), etc.

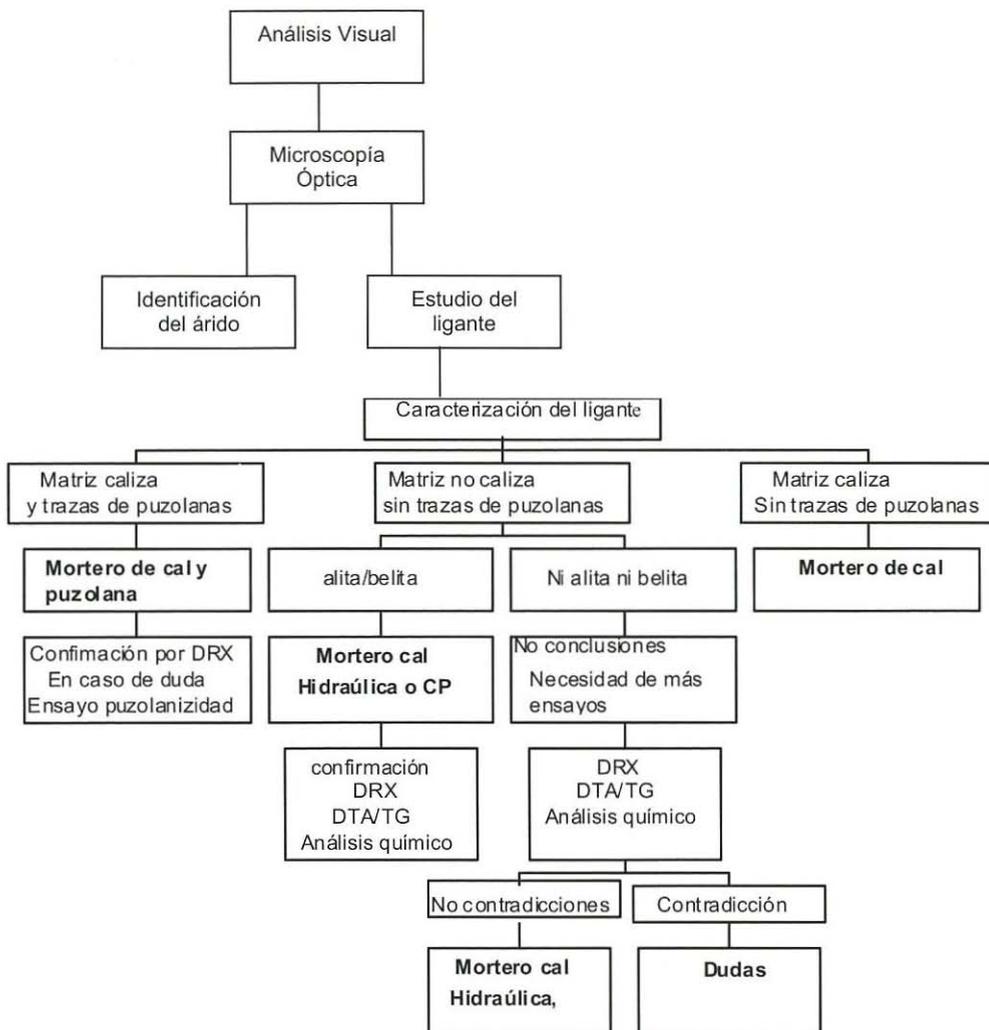


Figura 3. Esquema de procedimiento de identificación del ligante en morteros.

3. INTERACCIÓN DE MORTEROS Y CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Desde mediados del siglo pasado se ha producido un aumento de la contaminación atmosférica en las ciudades asociado a la presencia de gases contaminantes y a lo que se denomina “lluvia ácida”. En ambos casos, los contaminantes pueden interaccionar con los materiales de construcción, tanto naturales (piedras) como artificiales (morteros, ladrillos, etc.) acelerando su degradación.

La interacción de contaminantes (como partículas, aerosoles o gases) con la superficie de los materiales depende no sólo de su concentración en la atmósfera y del perfil de turbulencia en la capa de contacto, sino que también depende de factores atmosféricos tales como la fuerza y dirección del viento o la intensidad de la lluvia. Así mismo son importantes

otros factores relacionados con el material, como la estructura, naturaleza y reactividad, grado de protección al que están sometidos, o incluso el tiempo que tarda el material en secarse.

Con el fin de simplificar los estudios, se han desarrollado cámaras de laboratorio que simulan dichos ambientes. En estas cámaras, una variable o un grupo de variables se mantienen constantes y se modifican otras, pudiendo estudiar su efecto. En este contexto se trabajó en un proyecto europeo [5] estudiando el deterioro de morteros de cal, cal y puzolana y morteros de cemento por efecto de diferentes gases contaminantes (SO_2 , NO_x) tomando como variables la adición de agua y el efecto de oxidantes (ozono).

Con el fin de minimizar el efecto de la superficie y el tiempo de exposición así como la concentración del contaminante, se establecieron ecuaciones que determinan las velocidades de interacción de los diferentes agresivos con los materiales de construcción en términos de mg de contaminante $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ [6].

Los procesos de deterioro de los morteros con los contaminantes gaseosos se estudiaron a través de las sales formadas y depositadas en los mismos, que dependen de la composición del mortero y del gas contaminante. En el caso de que el contaminante gaseoso sea NO_x y el mortero un mortero de cal las sales formadas serán nitritos cálcicos que se oxidarán a nitratos cálcicos en presencia de oxidantes. Los morteros de cal presentan bajas interacciones con el NO y el NO_2 , siendo menor el efecto con el NO_2 . La presencia de agua acelera el proceso de deterioro con el NO_2 , pero no tiene ningún efecto con el NO . Si en el medio existen oxidantes y agua el deterioro se ve incrementado 10 veces. Si el gas contaminante es el SO_2 , las sales formadas son sulfitos cálcicos que se oxidan a sulfatos dando lugar a la formación de yeso. En este caso la acción conjunta de oxidante y agua acelera de manera muy importante (100 veces) el proceso de deterioro de los morteros de cal [7].

Los morteros de cal y puzolana presentan composiciones mineralógicas más complejas que los morteros de cal, sin embargo la interacción con SO_2 produce las mismas sales, sulfitos que se oxidan a sulfatos cálcicos, fundamentalmente en forma de yeso. De nuevo la exposición en ambientes con SO_2 , oxidante y agua hace que se incremente unas 80 veces el efecto agresivo del gas contaminante [8].

En el caso de los morteros de cemento en cuya composición además de calcita existe un silicato cálcico hidratado de naturaleza amorfa, de nuevo el principal compuesto formado por la interacción con el SO_2 atmosférico es el sulfato cálcico (yeso) proveniente de la oxidación de los sulfitos. Sin embargo y debido a que en el cemento existen además elementos minoritarios como el K , se produce también la formación de K_2SO_4 y singenita ($\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). En este tipo de morteros la presencia de agua acelera la velocidad de interacción 40 veces y el efecto conjunto de oxidante y agua acelera el proceso 100 veces [9-11].

Si en lugar de ser contaminantes gaseosos los que interaccionan con los morteros son contaminantes disueltos en agua, se habla de "lluvia ácida". El pH de la lluvia que sólo contuviera CO_2 disuelto sería de 5.6, la presencia en la atmósfera de otras especies ácidas, hace que el pH de la lluvia normal esté en valores alrededor de 5, por lo que se considera "lluvia ácida" al agua de lluvia que tenga un pH inferior a 5 y lleve disueltas varias sales.

Los estudios realizados sobre el efecto de la "lluvia ácida" en los diferentes morteros indican la formación de una disolución ácida sobre la superficie de los morteros, dicha disolución ataca a los componentes básicos del mismo, fundamentalmente el CaCO_3 produciendo su disolución y la formación de una sal cálcica (sulfato, nitrato, cloruro, etc) de diferente solubilidad. Las sales más solubles se lixiviarán de la muestra y las menos solubles

quedarán depositadas sobre la misma. De cualquier manera la lixiviación de las sales producirá diferente pérdida de material en el mismo [12].

Posteriormente a estos trabajos y en el marco del proyecto europeo [2] y de otros proyectos CICYT se demostró que además de sulfitos y sulfatos cálcicos se forman otras sales (etringita y taumasita) de naturaleza expansiva y por tanto muy agresivas, en morteros hidráulicos (cal y puzolana, cal hidráulica y cemento) como consecuencia de la interacción de dichos morteros con el SO_2 y/o CO_2 de la atmosfera [13, 14]. Los trabajos se realizaron igualmente en cámara de ambiente controlado, y en ellos se demostró que el contenido en Al_2O_3 del ligante así como la porosidad de los morteros son factores importantes en el proceso de sulfatación de los mismos [15]. Se demostró que bajo las condiciones de laboratorio se formó taumasita en los morteros de cal hidráulica y en los morteros fabricados con cemento portland y cemento blanco mineralizado. Sin embargo, cuando el ligante utilizado en los morteros fue cal y puzolana, no se formó taumasita [16]. El yeso fue el primer producto formado en la interacción entre los morteros y el SO_2 . A continuación, este yeso reacciona con la calcita y el gel C-S-H dando lugar a la formación de taumasita. Las bajas temperaturas favorecen la formación de taumasita. Se demostró también que la carbonatación de los morteros aporta suficientes carbonatos como para que el proceso se produzca sin necesidad de que el árido fuese calizo y que no es necesaria la presencia de Al_2O_3 en los morteros para que se forme taumasita [17-19].

4. DESARROLLO DE MORTEROS DE REPARACIÓN

4.1. Morteros con propiedades biocidas

En un el marco de un proyecto europeo y otro de la CICYT en el que se estudió el deterioro de mosaicos expuestos a la intemperie se llegó a la conclusión de que la principal causa de deterioro de la superficie teselar era la colonización biológica [20-23] (Figura 3).



Figura 3. Mosaicos deteriorados de la ciudad romana de Itálica.

Dicha colonización comenzaba en el material más poroso y que retenía agua por más tiempo, es decir por el mortero y desde allí se extendía a las teselas, en general menos

porosas. Conocida la causa se planteó la posibilidad de desarrollar un mortero de reparación con propiedades biocidas. La idea fue dotar al mortero de reparación de dichas propiedades en toda la masa y no solo en superficie, como modo de prolongar en el tiempo la permanencia de la propiedad biocida.

El mortero debería ser en base cal, es decir de igual base que el original y contener un biocida estable a fuerte pH (12,4), no fácilmente lixiviable por efecto de la lluvia, activo frente a hongos, algas y bacterias, que no modificase las propiedades reológicas y de adquisición de resistencias del mortero de cal y que mantuviese su actividad al estar en el seno de dicho mortero.

Se desarrolló entonces un mortero en base cal, en el que distintos biocidas se incorporaban al mismo adsorbidos en sepiolita (Figura 4).

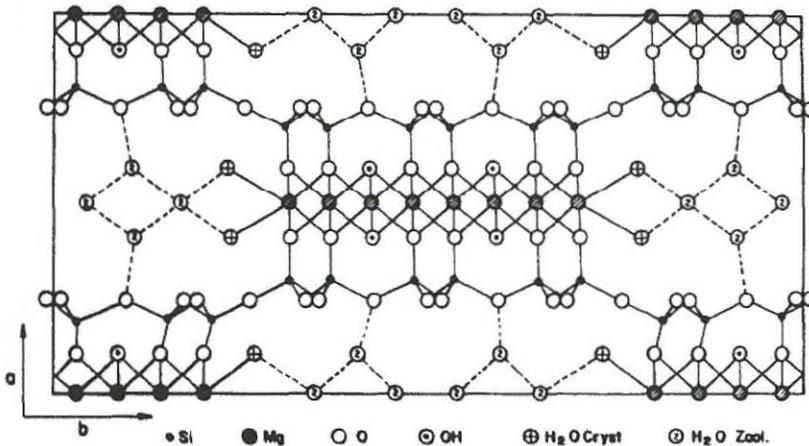


Figura 4. Estructura de la sepiolita, canales ceolíticos donde se adsorben los biocidas [24].

Se estudió la estabilidad de la sepiolita en medios básicos y su influencia sobre la carbonatación de morteros de cal, propiedades reológicas de los mismos etc. [24-26]. Se optimizó su dosificación (relaciones: cal/arena; agua/cal; sepiolita/cal) para obtener morteros con propiedades mecánicas y físicas similares a las originales de los mosaicos y con propiedades biocidas. Se comprobó finalmente la capacidad biocida de los nuevos morteros así como que su diferente composición no inducía modificaciones en su color, y durabilidad frente a agentes agresivos externos [27]. Posteriormente se patentaron distintos morteros con propiedades biocidas y diferente ligante, de uso no solo en la reparación de mosaicos sino también en enfoscados para paredes en orientación norte y expuestas a lluvia, para la fabricación de elementos para fuentes o albercas donde se quisiese evitar el crecimiento de microorganismos etc. [28].

4.2. Morteros de cal y metacaolín aditivados

El mortero de cal y puzolana fue utilizado en obras hidráulicas por fenicios e israelitas ya en el siglo décimo antes de Cristo. También los griegos lo utilizaron añadiendo cenizas volcánicas de la isla de Santorini a la cal, pero fueron los romanos los que llegaron a comprender la importancia de la adición de puzolanas, quienes lo utilizaron con mayor regularidad y quienes extendieron dicha práctica por el Imperio.

Los materiales puzolánicos son sustancias bien naturales o bien subproductos industriales de estructura amorfa o parcialmente cristalina y de composición silícica, silico-alumínica o una combinación de ambas. Las puzolanas no son capaces de endurecer por sí mismas cuando se mezclan con agua, pero cuando están finamente pulverizadas y se encuentran en presencia de agua, son capaces de reaccionar con el hidróxido cálcico a temperatura ambiente para formar silicatos cálcicos hidratados que desarrollan resistencias mecánicas considerables. Las puzolanas mejoran las propiedades mecánicas de los morteros de cal y los hacen menos permeables y más durables.

El metacaolín es una puzolana obtenida artificialmente por tratamiento térmico de caolinitas a temperaturas entre 600 y 750°C, de elevada reactividad, casi exento de álcalis y color blanco, lo que la hace ideal para el desarrollo de morteros destinados a la reparación o reposición de obras del Patrimonio Histórico.

La buena reactividad del metacaolín con el hidróxido cálcico se debe a su composición (silicatos tetraédricamente coordinados y aluminatos mayoritariamente en coordinación tetra y pentaédrica), estructura amorfa y elevada superficie específica. La elevada superficie específica del metacaolín favorece que reaccione a gran velocidad con el hidróxido cálcico, pero reduce la trabajabilidad del mortero, efecto que se corrige aumentando el agua de amasado, lo cual redundaría en una disminución de resistencias mecánicas, o bien se le podría añadir un aditivo reductor de agua.

Se diseñó un nuevo mortero de cal y metacaolín y arena [29] en base a los modelos estadísticos en los que se modelizó el comportamiento mecánico, la porosidad y de la composición del mortero siendo las variables A = relación cal/metacaolín, B = relación cal+metacaolín/arena, C = aditivo, D = tiempo de curado y E = tiempo de carbonatación. Las ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento mecánico y porosidad son:

$$R_{\text{compresión}} \text{ (Kp/cm}^2\text{)} = 39.36 + 0.70X_A + 18.01X_B + 15.86X_C - 1.92 X_D + \delta_{NE}^c + \delta_{BC} + \delta_{BD} + E$$

$$R_{\text{flexión}} \text{ (Kp/cm}^2\text{)} = 10.97 + 0.54X_A + 4.51X_B + 4.93X_C - 0.43 X_D + \delta_{NE}^f + \delta_{BC} + \delta_{BD} + \delta_{CD} + \delta_{CE} + E$$

$$\text{Porosidad (\% Volumen)} = 28.59 - 0.14X_A + 2.76X_B - 1.34X_C - 0.18X_D + \delta_{NE}^p + \delta_{AC} + \delta_{BC} + E$$

Las ecuaciones matemáticas que describen la composición del mortero son:

$$\beta = 5.06 + 0.11X_A + 1.84X_B + 0.26X_C + 0.014X_D + \delta_{NE}^{\beta} + \delta_{BC} + E$$

$$\gamma = 7.07 - 0.47X_A + 2.23X_B - 0.61X_C + 0.025X_D + \delta_{NE}^{\gamma} + E$$

$$\omega = 86.9 - 0.73X_A - 4.58X_B + 0.37X_C - 0.29X_D + \delta_{NE}^{\omega} + E$$

siendo β la cantidad de CaO en forma de CaCO₃ formado en la reacción de carbonatación, γ el producto formado de la reacción puzolánica entre la cal y el metacaolín y ω la cantidad de árido + metacaolín sin reaccionar.

De estas ecuaciones se deduce que:

- La relación cal+metacaolín/árido es el factor que tiene un mayor impacto en todas las propiedades estudiadas: resistencias mecánicas, porosidad y composición del mortero. Al aumentar esta relación, aumentan las resistencias mecánicas, porosidad y cantidad de producto de la reacción formado.
- El siguiente factor por orden de importancia es la presencia de aditivo, que afecta a la porosidad, resistencias mecánicas y cantidad de calcita en las muestras. La presencia de aditivo aumentó las resistencias, el porcentaje de calcita en el mortero y disminuyó la porosidad.

c) La relación cal/metacaolín tiene un efecto moderado en las resistencias a flexión y compresión del mortero.

d) Ni el tiempo de curado, ni el tiempo de carbonatación (en los rangos estudiados) tienen efecto significativo en la composición y porosidad de los morteros de cal, metacaolín y arena estudiados, pero sí tiene un efecto moderado en la resistencia mecánica.

Se estudiaron también tres morteros en base cal (cal+arena; cal+puzolana+arena; cal+metacaolín+arena) como alternativa a los morteros de cemento para su uso en restauración. Así mismo se preparó un mortero de cemento blanco y arena para comparar.

El estudio de la influencia que la modificación de la dosificación y uso de aditivo tuvo sobre la porosidad, resistencias mecánicas, distribución de tamaño de poro, coeficiente de saturación y durabilidad de los morteros en base cal (hielo/deshielo; cristalización de sales) propuestos como alternativa a los morteros de cemento para su uso en Restauración, permitió obtener las siguientes conclusiones:

a) En todos los morteros estudiados disminuyó la porosidad al aumentar la cantidad de árido y con el uso del aditivo. Los morteros de cemento blanco y arena fueron los que menores valores de porosidad presentaron, ligeramente inferiores a las que presentaron los morteros de cal, puzolana y arena.

b) Los valores de resistencias mecánicas aumentaron en todos los morteros con la disminución del árido y la presencia de aditivo. De los morteros en base cal, los de cal, metacaolín y arena, fueron los que mayores valores de resistencias mecánicas mostraron, muy inferiores a las observadas en los morteros de cemento blanco y arena.

c) La distribución de tamaño de poro de los morteros de cal y arena y de los morteros de cal, metacaolín y arena no se modificó ni por el efecto de la dosificación, ni por el uso del aditivo; mientras que los morteros de cal, puzolana y arena experimentaron cambios por efecto de la dosificación y los morteros de cemento blanco y arena por efecto de la dosificación y del empleo del aditivo.

d) En todos los morteros al aumentar la cantidad de árido y al añadir el aditivo se redujeron los valores de los coeficientes de saturación.

5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO DE LA POLIMERIZACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS HIDROFUGANTES.

Los morteros de cal se caracterizan por tener unas determinadas propiedades, tales como elevada porosidad, baja resistencia mecánica, fácil trabajabilidad, etc. que les hacen ser vulnerables a diferentes ataques: a) ataque físico (variaciones de temperatura, cristalización de sales, ciclos hielo/deshielo, etc); b) ataque químico (reacciones de disolución del ligante, reacción con gases agresivos, etc) y c) ataque biológico producido por el crecimiento de diferentes microorganismos en el mortero.

Esta vulnerabilidad al ataque físico, químico y biológico está directamente relacionada con sus propiedades físicas, tales como la elevada porosidad. En el proceso de fabricación de los morteros de cal se añade agua con el fin de favorecer el amasado, pero sin intervenir en ningún tipo de reacción. Este agua necesaria para el amasado es uno de los factores que influye en la elevada porosidad de los morteros de cal.

Con el fin de disminuir la porosidad y aumentar las resistencias mecánicas y de esta manera reducir la posibilidad de ataque químico, se añaden diferentes sustancias puzolánicas e

incluso tal y como se ha descrito en el apartado 4.2, aditivos plastificantes. En los casos en los que la reducción de porosidad y permeabilidad por esos procedimientos no es suficiente para alcanzar los objetivos que se deseen, se pueden aplicar tratamientos superficiales para evitar la penetración del agua [29, 30].

Dichos tratamientos se aplican en la superficie de los morteros, por lo que son los más vulnerables a experimentar deterioro. Sin embargo, por encontrarse en pequeñas cantidades es difícil seguir su evolución con el fin de determinar cuando están deteriorados y hay que sustituirlos. Se realizó un estudio mediante técnicas espectroscópicas, FTIR, Micro-Raman y ^{29}Si , ^1H y ^{13}C RMN, de los tratamientos hidrofugantes antes y después de polimerizar tanto en laboratorio como *in situ* sobre los morteros de cal.

Se determinaron los diferentes grados de polimerización de los componentes activos de los tratamientos observándose una menor polimerización en las muestras *in situ*. Se vio que ^{13}C MAS RMN permite determinar uniones del tipo $-\text{C}(\text{C}^*\text{H}_3)_3$; $\text{R}^*\text{-Si-O-Si}$; $\text{Si-C}^*\text{H}_3$ que son adecuadas para identificar el producto aplicado sobre el mortero. Finalmente se estableció una metodología de estudio que permite seguir la evolución de los tratamientos hidrofugantes derivados del ácido silícico, aplicados sobre superficies de mortero.

6. COMPATIBILIDAD DE MATERIALES EN OBRAS DEL PATRIMONIO

Uno de los aspectos que hay que tener en cuenta en el proceso de construcción y por supuesto en el de reparación de elementos constructivos deteriorados es la compatibilidad de materiales. Esta compatibilidad ha de ser no solo de tipo químico, es decir materiales estables y que no reaccionen entre sí, sino también respecto de sus propiedades físicas, estabilidad de volumen, etc.

Los muros y ventanas de la fachada sur de la catedral de Toledo a la altura del primero y segundo triforio se hayan casi totalmente cubiertos por dos revocos de distinto espesor y naturaleza.

Los revocos presentan deterioros tales como: despegamientos, roturas fisuraciones, e incluso total desaparición del material en algunas zonas con exposición de la piedra base al ambiente (Figura 5).

La piedra base es una dolomía y está cubierta por un revoco de yeso con áridos de yeso, de 3-4cm de espesor y finalmente otro de mortero de cal de 0,5-0,8 mm de espesor.

Conocida la composición química y mineralógica de los materiales se determinaron los coeficientes de dilatación térmica e hídrica de los mismos.

La Figura 6 presenta un alzado de una de las ventanas del primer triforio, en la que se detallan las zonas donde se han tomado las muestras de los revocos y de la piedra base.

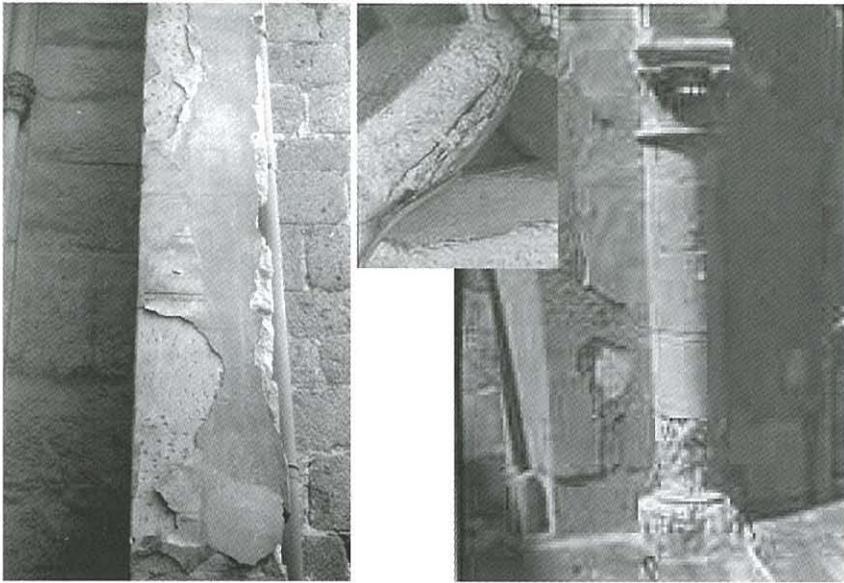


Figura 5. Aspecto de los revocos y enlucidos que cubren la fachada sur de la catedral de Toledo a la altura del primero y segundo triforio.

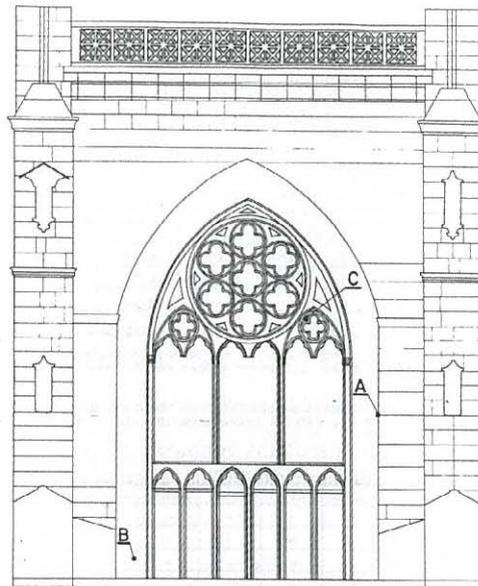


Figura 6. Zona de toma de muestras A = D1 e Y1; B = D2 e Y2; C= D3, Y3 y C3. (D= dolomita; Y = yeso; C = enlucido de cal).

El coeficiente de dilatación hídrica (Figura 7) del mortero de cal es muy pequeño y muy diferente del de los otros dos materiales siendo el de la dolomita superior que el del yeso (Figura 8), mientras que los tres materiales expanden (coeficiente de expansión térmica) al aumentar la temperatura hasta 100°C. El mortero de yeso, intermedio entre los otros dos materiales, expande a 50°C el doble que la piedra dolomítica, y 10 veces más que el mortero de cal.

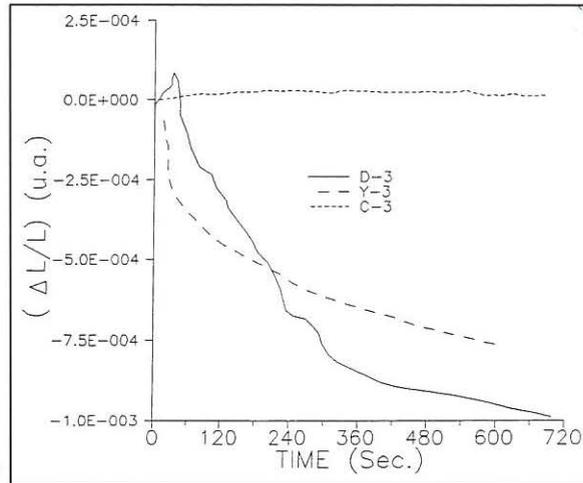


Figura 7. Coeficiente de dilatación hídrica de los tres materiales tomados en el punto C.

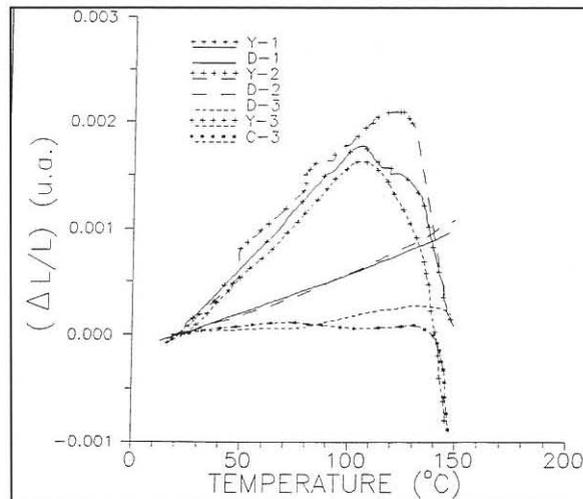


Figura 8. Coeficiente de dilatación hídrica de los tres materiales tomados en los puntos A, B y C de la Figura 5.

Teniendo en cuenta estos resultados y los datos climáticos de la ciudad de Toledo así como la orientación de la fachada, la dirección del viento y lluvia dominantes, se concluye que la mayor expansión lineal del mortero de yeso intermedio respecto a los otros dos materiales, así como la

contracción hídrica experimentada por la dolomía y el mortero de yeso respecto al mas exterior de cal, explica el estado de deterioro en que estos materiales se encuentran [31].

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CAM la concesión del proyecto 200660M070 y al Ministerio de Fomento el proyecto C31/2006.

8. REFERENCIAS

- [1] Furlan, V. (1991): Causes, mechanisms and measurement of damage to mortars, bricks and renderings. En *Science, technology, and European cultural heritage. Proceedings of the European symposium. Bologna, Italy, 13-16 June 1989*: 149-159.
- [2] Proyecto "Environmental deterioration of ancient and modern hydraulic mortars" financiado por la UE y la CYCIT (1996-1999).
- [3] Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Martínez, S., Acción, F. y Alvarez, G. (1992): Methodology of analysis of stones and mortars in monuments. En J. Delgado Rodrigues, Fernando Henriques y F. Telmo Jeremias (eds.) *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 763-770. Lisboa.
- [4] Van Balen, K., Toumbakari, E.E., Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J., Puertas, F., Palomo, A., Sabbioni, C., Riontino, C. y Zappia, G. (2003) Environmental deterioration of ancient and modern hydraulic mortars. En *Protection and Conservation of the European Cultural Heritage. Research report n° 15*. Luxemburgo: European Community.
- [5] Proyecto "Decay of mortars in historic buildings. Development of decay resistant mortars" financiado por la UE (1991-1994) (Ref. CT90 0107).
- [6] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F., Blanco-Varela, M.T. y Thompson, G.E. (1997): Studies on degradation of lime mortars in atmospheric simulation chambers. *Cement and Concrete Research* 27: 777-785.
- [7] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F., Blanco-Varela M.T. y Thompson, G.E. (1998): Effect of dry deposition of pollutants on the degradation of lime mortars with Sepiolite. *Cement and Concrete Research* 28:125-133.
- [8] Martínez-Ramírez, S. y Thompson, G.E. (1999): Degradation of lime-pozzolan mortar exposed to dry deposition of SO₂ pollutant gas: influence of curing temperature. *Materials and Structure* 32: 377-382.
- [9] Martínez-Ramírez, S. y Thompson, G.E. (1999): Wet deposition studies of hydration mortars. *Materials and Structure* 32: 606-610.
- [10] Martínez-Ramírez, S. (1999): Influence of SO₂ deposition in cement mortar hydration. *Cement and Concrete Research* 29: 107-111.
- [11] Martínez-Ramírez, S. y Thompson, G.E. (1998): Dry and wet deposition studies of the degradation of cement mortars. *Materiales de Construcción* 48: 15-31.
- [12] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Thompson, G.E. y Almendros, P. (1998): Behaviour of repair lime mortars by wet deposition. *Cement and Concrete Research* 28: 221-229.
- [13] Sabbioni, C., Zappia, G., Riontino, C., Blanco Varela, M.T., Aguilera, J., Puertas, F., Van Balen, K. y Toumbakari, E.E. (2001): Atmospheric deterioration of ancient and modern hydraulic mortars. *Atmospheric Environment* 35: 539-548.
- [14] Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J., Martínez-Ramírez, S., Puertas, F., Palomo, A., Sabbioni, C., Zappia, G., Riontino, C., Van Balen, K. y Toumbakari, E.E. (2003): Thaumassite formation due to SO₂/Hydraulic mortar interaction. *Cement and Concrete Composites* 25: 983-990.

- [15] Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J. y Martínez-Ramírez, S. (2006): Effect of cement C₃A content, temperature and storage medium on thaumasite formation in carbonated mortars. *Cement and Concrete Research* 36: 707-715.
- [16] Blanco-Varela, M.T., Martínez-Ramírez, S., Adeva, F. y Pajares, I. (2005): Influence of cement type in thaumasite formation. En R.K. Dhir y T. Thelford (eds.) *Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*. Vol. 6: 749-755. Dundee: Thomas Telford.
- [17] Aguilera, J., Martínez Ramírez, S., Pajares, I. y Blanco-Varela, M.T. (2003): Formation of thaumasite in carbonated mortars. *Cement and Concrete Composites* 25: 991-996.
- [18] Aguilera J., Blanco-Varela, M.T. y Martínez-Ramírez, S. (2003): Thermodynamic investigation of the CaO-SiO₂-CaCO₃-H₂O closed and open system at 25°C. *Materiales de Construcción* 53: 35-43.
- [19] Blanco-Varela, M.T., Aguilera, J. y Martínez-Ramírez, S. (2005): Thermodynamic compatibility of thaumasite with hydrated cement phases. En R.K. Dhir y T. Thelford (eds.) *Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities*. Vol. 6: 743-748. Dundee: Thomas Telford.
- [20] Blanco-Varela, M.T., Menéndez, E. y Saiz-Jiménez, C. (1992): Vitreous Tesserae decay from Italica's mosaics: SEM EDX characterization. En A. López Galindo y M.I. Rodríguez-García (eds.) *Electron Microscopy, vol 2. Material Sciences: 783-784*. Granada: EUREM 92.
- [21] Puertas, F., Blanco Varela, M.T. y Palomo, A. (1992): Degradación de morteros antiguos. Estudio de los mosaicos de Itálica. *Tribuna de la Construcción* 8: 48-53.
- [22] Blanco-Varela, M.T., Puertas, F., Macias, A. y Palomo, A. (1992): Study of support roman mortars of Italica's mosaics. En J. Delgado Rodrigues, F. Henriques y F. Telmo Jeremias (eds.) *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 1299-1316. Lisboa.
- [23] Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Palomo, A., Ortega, J.J., Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1994): Decay of Roman and Repair Mortars of the Mosaics of Itálica, Spain. *Science of the Total Environment* 153: 123-131.
- [24] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F. y Blanco-Varela, M.T. (1994): Stability of a Spanish Sepiolite in neutral and basic media. *Advanced Materials Research* 1-2: 587-592.
- [25] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F. y Blanco-Varela, M.T. (1995): Carbonation process and properties of lime mortars with sepiolite. *Cement and Concrete Research* 25: 39-50
- [26] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F. y Blanco-Varela, M.T. (1996): Stability of sepiolite in neutral and alkaline media at room temperature. *Clay Minerals* 31: 225-232.
- [27] Martínez-Ramírez, S., Puertas, F. y Blanco-Varela, M.T. (1995): Morteros de reparación basados en cal. Ensayos de envejecimiento acelerado. *Materiales de Construcción* 45: 35-45.
- [28] Martínez, S., Puertas, F. y Blanco M.T. (1994): *Mortero con propiedades biocidas*. Patente nº 9401732, (España).
- [29] Fortes-Revilla, C., Martínez Ramírez, S. y Blanco-Varela, M.T. (2006): Modelling of lime and metakaolin mortar characteristics in terms of process variables: dosage and curing and carbonation time. *Cement and Concrete Composites* 28: 458-467.
- [30] Blanco-Varela, M.T. y Fortes Revilla, C. (2004): Effect of chemical admixtures on lime –metakaolin mortars characteristics. *Coalition* 7: 8-11.
- [31] Macias, A., De Frutos, J., Blanco-Varela, M.T. y Puertas, F. (1992): The deterioration of mortars in Toledo's Cathedral: studies on thermal and hygric expansion. En J. Delgado Rodrigues, F. Henriques y F. Telmo Jeremias (eds.) *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 1213-1221. Lisboa.

NUEVAS ESTRATEGIAS EN EL ESTUDIO ARQUEOMÉTRICO DE VIDRIOS HISTÓRICOS

N. Carmona, M. García-Heras y M.A. Villegas

**Laboratorio de Arqueometría de Materiales
Instituto de Historia, Centro de Ciencias Humanas y Sociales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Albasanz, 26-28
28037 Madrid**

Resumen. Se exponen las actividades científico-técnicas del grupo de investigación sobre vidrios históricos, siguiendo un orden cronológico y aludiendo a los trabajos más representativos que se han desarrollado desde 1999. El esquema inicial de tres líneas principales de investigación (caracterización químico-física, procedimientos de protección activa y sistemas de conservación preventiva de vidrios) se ha mantenido hasta el presente y se ha enriquecido con la adopción de técnicas de caracterización no destructivas, así como con una línea dedicada a arqueometría de materiales cerámicos. La incorporación del equipo investigador a la nueva sede del Instituto de Historia en el Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC ha supuesto la instalación de nuevos laboratorios de arqueometría de vidrios y materiales cerámicos, donde se proyectan las actividades presentes y futuras del grupo de investigación. El carácter inter y multidisciplinar de las actividades científicas que se desarrollan se ha reforzado con la orientación integradora de grupos de investigación y temáticas del Instituto de Historia en el nuevo Centro.

1. ORÍGENES

En España el estudio de vidrios históricos desde el punto de vista científico y técnico se inició en 1999, gracias a la iniciativa de José M^a Fernández Navarro, entonces jefe del Departamento de Vidrios del Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC. Dicha iniciativa concretó diversas actividades anteriores (conferencias, cursos, artículos científicos, informes técnicos) más o menos esporádicas que se alternaban con las investigaciones sobre vidrios actuales y su tecnología. Fueron los vidrios de la Catedral de León (s. XIII) los que captaron la atención de los investigadores implicados y en respuesta a las interesantes patologías y problemas de restauración y conservación que presentaban, el Prof. Fernández Navarro articuló un proyecto de investigación de tres años que obtuvo la financiación mixta de la CICYT y de fondos FEDER (*Estudio de los procesos de alteración de vidrieras históricas y de los tratamientos para su restauración y protección*, 1999-2001). Se formó un equipo investigador de químicos especialistas en vidrio y químicos analíticos y se abordó el estudio científico de las vidrieras de la Catedral de León. En el marco del proyecto mencionado se colaboró estrechamente con el Taller de Restauración de Vidrieras de dicha catedral y con su responsable Ángeles Robles Robles, y se llevó a cabo una tesis doctoral [1]. Durante el desarrollo del proyecto el Prof. Fernández Navarro fue nombrado Director General de la Fundación Centro Nacional del Vidrio, Real Fábrica de Cristales de La Granja de San Ildefonso (Segovia), en cuyo laboratorio se realizó la tesis doctoral mencionada.

Los procesos de deterioro y degradación químicos de los vidrios de la Catedral de León son debidos a la exposición de las vidrieras a la acción intensa y continuada de la intemperie (cambios bruscos de temperatura, humedad y contaminación ambiental). Estos fenómenos son los correspondientes al ataque hidrolítico y alcalino que se producen en vidrios de silicato potásico cálcico [2], es decir, los vidrios cuya composición química responde, más frecuentemente, a la de vidrios medievales, también denominados vidrios de bosque o de cenizas, ya que se utilizaban cenizas de madera ricas en K₂O como fundente, en lugar de Na₂O. Estos vidrios se caracterizan por una resistencia química relativamente baja,

comparada con los vidrios de silicato sódico cálcico (por ejemplo, los vidrios romanos o los vidrios comunes actuales) [3]. Son vidrios que se atacan fácilmente en un ambiente húmedo dando lugar a picaduras (Figura 1) que posteriormente crecen hasta formar cráteres (Figura 2). Esta patología es la consecuencia de la desalcalinización superficial del vidrio debido al ataque hidrolítico [4,5].

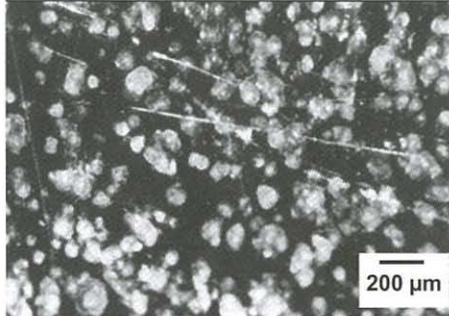


Figura 1. Fotografía al microscopio óptico de las pequeñas picaduras que aparecen sobre la superficie de un vidrio original del siglo XIII de la Catedral de León.

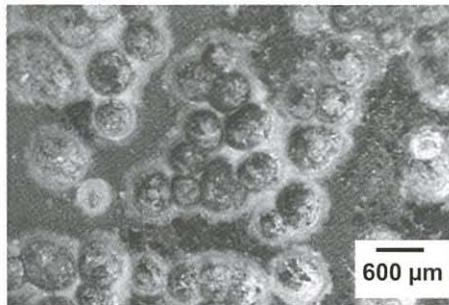


Figura 2. Fotografía al microscopio óptico de la superficie externa de un vidrio original del siglo XIII de la Catedral de León. Se observan abundantes cráteres que, en algunos casos, aparecen rellenos de productos de corrosión (sales insolubles cristalizadas).

La combinación de una humedad relativa elevada y de contaminantes gaseosos con propiedades ácidas (SO_2 , NO_x , CO_2 , etc.), disueltos en el aire o en la lluvia, intensifica la corrosión superficial del vidrio, puesto que transforma el ataque hidrolítico en un ataque ácido que posteriormente evoluciona a un ataque alcalino, mucho más agresivo para el vidrio. El resultado es la destrucción de la red del vidrio que produce pérdidas de masa y la formación de productos de corrosión, cuyos compuestos insolubles quedan depositados en los cráteres profundos e interconectados (Figura 3) que forman gruesas costras de corrosión (Figura 4).

Otras patologías habituales en vidrios medievales, de características similares a los de las vidrieras de la Catedral de León, son los *enmarronamientos* (oscurecimiento general y pérdida de transparencia), desprendimiento y pérdida de *grisallas* (pinturas vitrificables de las capas pictóricas de la vidriera), manchas de óxidos procedentes de la oxidación de la *ferramenta* (elementos metálicos sustentantes de la vidriera), deformaciones de los paneles (curvaturas y descolgamientos debidos a la presión del viento), depósitos de origen

extrínseco (deyecciones de aves, líquenes, musgos), signos de biodeterioro (manchas y depósitos causados por colonias de bacterias y hongos), defectos de origen mecánico o vandálico (fisuras, grietas, roturas y faltas), etc.

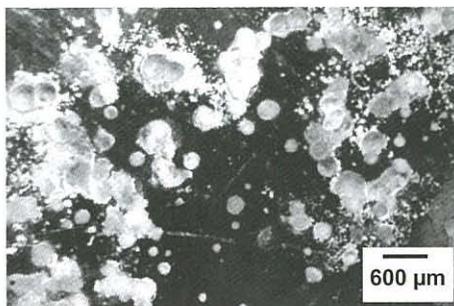


Figura 3. Fotografía al microscopio óptico de la superficie externa de un vidrio original del siglo XIII de la Catedral de León. Se observan cráteres interconectados y pérdida de masa del vidrio.

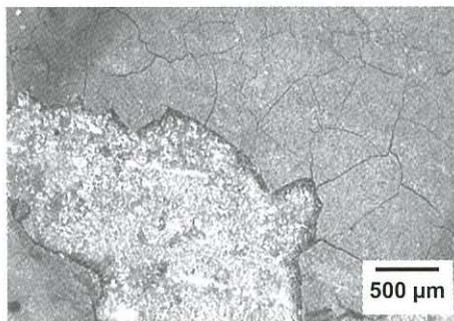


Figura 4. Micrografía de MEB de la superficie exterior de un vidrio original del siglo XIII de la Catedral de León. Se observa una gruesa costra de corrosión agrietada y parcialmente desprendida.

La caracterización químico-física de los vidrios históricos está relacionada con el estudio de su estado de conservación presente. Por lo tanto, se incluye la evaluación de los signos de deterioro, degradación y corrosión que son patentes y la asignación de los correspondientes mecanismos químico-físicos que han producido las deficiencias mencionadas. Para ello se utilizaron, y aún se utilizan, técnicas convencionales más o menos destructivas de análisis químico y de observación directa (determinaciones analíticas por vía húmeda, espectrometría de fluorescencia de rayos X (FRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), espectrometría de dispersión de energías de rayos X (EDX), microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (MEBEC), etc. La coloración de los vidrios se estudia casi invariablemente por espectrofotometría visible (VIS), y la identificación de las fases cristalinas en los depósitos de productos de corrosión, picaduras superficiales y eventuales desvitrificaciones por difracción de rayos X (DRX). La microestructura superficial o en sección transversal se observa mediante microscopías óptica y electrónica de barrido. Esta última técnica es muy útil para el estudio de las decoraciones de los vidrios (grabados y tallas, pinturas vitrificables o *grisallas*, veladuras, esmaltados, dorados, etc.), y permite evaluar el espesor de las decoraciones y capas pictóricas, su estado de conservación y obtener datos analíticos locales o puntuales gracias a la técnica de microanálisis por EDX acoplada al microscopio electrónico de barrido [6] (Figura 5).

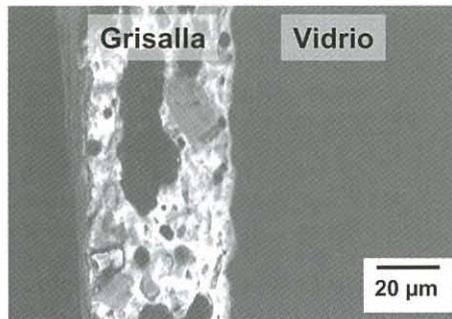


Figura 5. Micrografía de MEB de la sección transversal de un vidrio original del siglo XIII de la Catedral de León con una grisalla aplicada sobre su superficie.

Con el fin de ofrecer alternativas prácticas para los procesos de restauración y protección de las vidrieras de la Catedral de León, se realizó un estudio sobre recubrimientos protectores. Los procedimientos de protección activa para vidrios históricos consisten en la aplicación directa sobre la superficie alterada, degradada o corroída de dichos vidrios de capas, recubrimientos o películas que ejercen una función de barrera inerte y aislante respecto al medio ambiente. La aplicación de los recubrimientos de protección se puede llevar a cabo mediante bombardeo iónico (*sputtering*), el procedimiento sol-gel o la aplicación por contacto directo de resinas u otros compuestos orgánicos que forman películas adherentes [7, 8]. Los requerimientos para los recubrimientos protectores deben basarse en el criterio de mínima intervención, por lo que han de ser reversibles, químicamente inertes respecto al vidrio y ópticamente inocuos (transparentes, incoloros y de índice de refracción lo más parecido posible al del vidrio a recubrir). Otras propiedades imprescindibles de los recubrimientos protectores se refieren a su capacidad para actuar como aislante del medio ambiente y de los agentes que inician y activan la degradación de los vidrios históricos (humedad, contaminación, choque térmico, irradiación luminosa). La buena adherencia de los recubrimientos garantiza una protección duradera y segura frente a los agentes químico-físicos agresivos para los vidrios. Sin embargo, una adherencia total impide la eliminación del recubrimiento (irreversibilidad) en intervenciones futuras (Figura 6).

Prácticamente en el mismo periodo el grupo de investigación desarrolló un proyecto sobre sensores ópticos preparados por el procedimiento sol-gel (*Películas sol-gel dopadas con moléculas orgánicas para sensores ópticos*, 1998-2001). La motivación de esta temática partió del hecho de que la conservación preventiva de vidrios históricos es una cuestión poco definida y además poco frecuente. En el caso de vidrieras normalmente consiste en instalar un acristalamiento común en el lugar de la vidriera histórica y retranquear ésta hacia el interior del edificio. De este modo el acristalamiento protector queda por delante de la vidriera histórica y ésta queda al abrigo del ambiente exterior y de los agentes agresivos. Este tipo de protección da lugar a un nuevo microclima entre el acristalamiento exterior y la vidriera original que, en determinadas ocasiones o épocas de año, puede originar condensaciones. La aparición de estos problemas aceleraría el deterioro de la vidriera original y por ello es necesario facilitar la ventilación continua del espacio entre la vidriera y el acristalamiento, así como realizar una evaluación sencilla del microambiente (control de la humedad relativa, la temperatura y presencia de contaminantes).

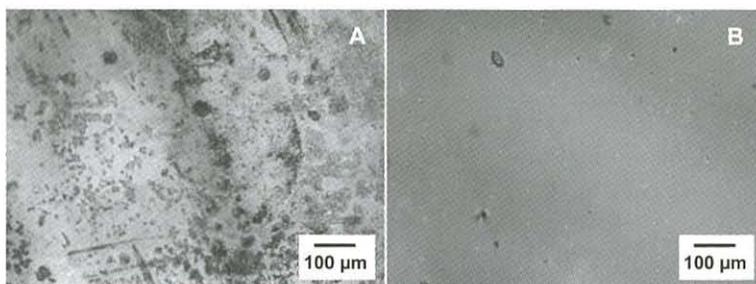


Figura 6. Fotografías al microscopio óptico de un vidrio modelo. A) sin recubrir y B) con un recubrimiento de SiO_2 aplicado mediante *sputtering*. Ambas fotografías se tomaron después de un tratamiento de envejecimiento acelerado con cambios bruscos de humedad, temperatura y dosis controladas de SO_2 como contaminante ácido.

Por otro lado, en el interior de museos, vitrinas o en salas de exposición y almacenes sólo se puede llevar a cabo una conservación preventiva controlando el microambiente. Para ello es muy útil el uso de sensores que, sin interactuar con la pieza de vidrio histórico, pueden alertar sobre los cambios más o menos bruscos que se producen en su entorno. Los sensores ambientales de respuesta óptica basados en la tecnología sol-gel han demostrado su idoneidad para este fin. Con los sensores ópticos sol-gel se pueden evaluar diversos parámetros ambientales que afectan a la correcta conservación de los vidrios y, en general, la de todos los materiales históricos que se pretenda conservar. Los primeros sensores diseñados y preparados fueron los destinados a evaluar la acidez del aire (Figura 7). Las propiedades químico-físicas de dichos sensores son muy favorables, así como sus umbrales de sensibilidad, tiempo de respuesta, reversibilidad, vida útil, etc. Estos sensores presentan, además, otras ventajas como son su pequeño tamaño, facilidad de uso y manejo y bajo coste de producción.

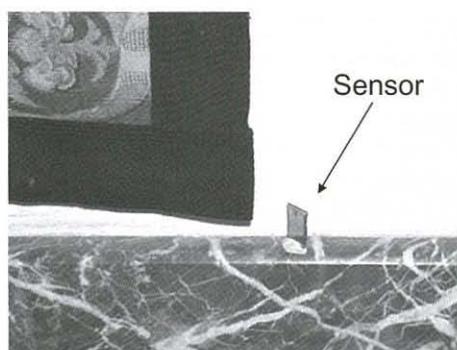


Figura 7. Un sensor óptico de acidez colocado junto a un tapiz histórico del castillo de Wawel en Cracovia (Polonia).

Dichos sensores se diseñaron y aplicaron para la evaluación de la calidad ambiental, concretamente para la detección de la acidez del aire que, como se había comprobado, constituía la primera causa de degradación de los vidrios y, en particular, de los vidrios medievales de silicato potásico cálcico. El esquema del fundamento óptico de los sensores se muestra en la Figura 8. La investigación sobre sensores dio lugar a diversos artículos científicos [9-13] y a una patente [14].

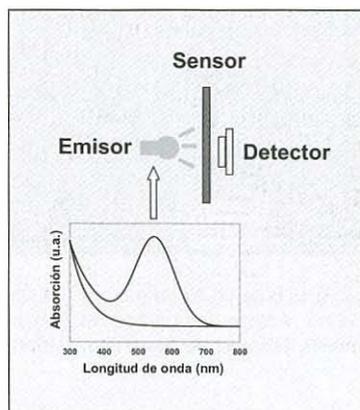


Figura 8. Esquema del fundamento de un sensor óptico ambiental.

En el año 2001, al finalizar el proyecto sobre las vidrieras de la Catedral de León, el equipo investigador concluyó su colaboración. Los miembros que continuaron con el estudio de vidrios históricos se encontraban dispersos en la Fundación Centro Nacional del Vidrio (Prof. Fernández Navarro), el Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM-CSIC (M.A. Villegas) y el Fraunhofer Institut de Würzburg, Alemania (N. Carmona).

2. CONSOLIDACIÓN

El grupo de investigación consolidó definitivamente su línea de investigación sobre vidrios históricos durante los años 2001 y 2002 en el CENIM. Este periodo coincidió con la creación de la Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural (RTPHC) y la incorporación de Manuel García Heras, arqueólogo de formación arqueométrica que concluyó su estancia en el Smithsonian Centre for Materials Research and Education, Washington D.C., EE.UU. El grupo de investigación formó el nodo de la RTPHC denominado *Conservación integral del patrimonio histórico vidriero* en el que, además de abordar científicamente el estudio de los vidrios históricos, se ampliaba a otros materiales muy relacionados como son los elementos metálicos de sujeción de vidrieras, la red de emplomado, las masillas de relleno, los morteros de recibo, etc. De este modo se daba respuesta a la necesidad de evaluar de modo integral el deterioro de las vidrieras y otros objetos de vidrio con interés histórico, para ofrecer alternativas reales y viables en su restauración y conservación preventiva [3, 15, 16]. Asimismo, el modo profundizó en el diseño y preparación de sensores ópticos para la evaluación de la acidez ambiental [17, 18].

Durante este periodo el estudio de vidrios históricos prosiguió sin un marco específico de proyectos o contratos de investigación. Sin embargo, se abordó la caracterización de diversos conjuntos de muestras de distinta procedencia. Entre ellos se destacan los cuatro casos de estudio que se comentan a continuación.

Cuentas de vidrio prerromanas. En las cuentas de vidrio procedentes de la necrópolis celtibérica de Numancia (s. II a.C.) se estudió su estado de conservación y patologías específicas derivadas del enterramiento, composición química, especies químicas cromóforas (responsables de la coloración), etc. [19] (Figura 9).



Figura 9. Cuentas de vidrio de la necrópolis celtibérica de Numancia (Soria).

Lámpara de la capilla Palafox de la Catedral de Burgo de Osma (Soria). Esta lámpara del s. XVIII (Figura 10) constituye un ejemplar único de araña producido en la Real Fábrica de Cristales de La Granja de San Ildefonso. El estudio analítico del vidrio puso de manifiesto que la lámpara se elaboró con vidrio cristal al plomo, es decir con vidrio que contiene alrededor de un 24 % en peso de PbO [20]. Este hecho fue desconocido incluso para la Fundación Centro Nacional del Vidrio, Real Fábrica de Cristales, hasta que se llevaron a cabo los análisis correspondientes.

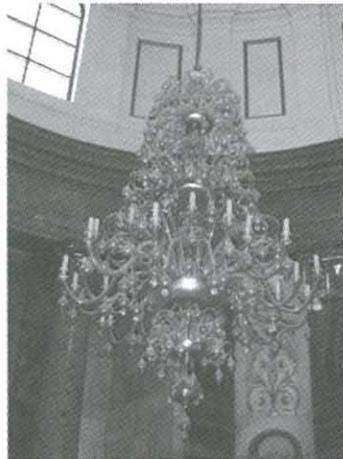


Figura 10. Lámpara de la capilla Palafox de la Catedral de Burgo de Osma (Soria).

Vidrieras de la Casa Goyeneche de Madrid. Las vidrieras de la Casa Goyeneche (s. XIX-XX), elaboradas en el Taller de Maumejean Hnos., demostraron la importancia de la contaminación atmosférica en el mecanismo de deterioro de los vidrios. Si bien se trataba de vidrios de silicato sódico cálcico, de mayor estabilidad química en comparación con la de los vidrios medievales, su estado de conservación era bastante deficiente [21]. Dichos vidrios habían estado expuestos durante el pasado siglo a un ambiente urbano contaminado con gases ácidos, procedentes del intenso tráfico rodado de las calles adyacentes. El resultado del abandono, vandalismo y depósitos de suciedad y hollín puede observarse en la Figura 11.



Figura 11. Fragmento de una vidriera de la Casa Goyeneche de Madrid. Se observan roturas en los vidrios y depósitos de hollín y suciedad.

Elementos metálicos de las vidrieras de la Catedral de Sevilla (s. XV) y del Monasterio de Pedralbes (s. XIV). Uno de los primeros trabajos sobre elementos metálicos relacionados con las vidrieras históricas fue el de la caracterización analítica completa y evaluación del estado de conservación de diversos conjuntos procedentes de las vidrieras de estos dos monumentos. Se estudiaron tanto perfiles de plomo como elementos de hierro y acero de las barras de sujeción [15]. Por primera vez se investigó sobre los efectos sinérgicos entre vidrios y metales de las vidrieras y se realizó un estudio sistemático de los procesos de alteración y corrosión de los metales implicados (Figura 12).

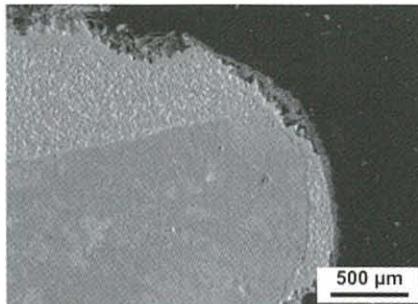


Figura 12. Micrografía de MEB de la sección transversal de un perfil de plomo procedente de una vidriera del Monasterio de Pedralbes (Barcelona).

En cuanto a la línea de investigación sobre sensores ambientales, se exploraron varios colorantes orgánicos que mostraban sensibilidad óptica frente a los cambios de pH y se prepararon y caracterizaron diversos sensores aplicables en la conservación preventiva no sólo de vidrios históricos, sino de cualquier material susceptible de deterioro por la acción de ambientes contaminados. Los sensores consisten en una lámina de vidrio común al que se adhiere una capa delgada (≈ 300 nm) y amorfa de sílice pura dopada con un colorante sensible. Como ya se ha indicado, dicha capa se prepara por el procedimiento sol-gel y presenta buenas propiedades químicas, fotoquímicas, térmicas y mecánicas. Cuando el sensor se expone a una atmósfera con contaminantes ácidos, se produce un cambio de

color o de la intensidad de color. La evaluación del cambio de color en el sensor se puede realizar cualitativamente (comparación con una escala de color) o cuantitativamente (registrando los espectros visible e interpolando en una curva de calibrado) (Figura 13).



Figura 13. Resumen de la evaluación cualitativa de un microambiente con un sensor de acidez.

3. EVOLUCIÓN

A partir del año 2003 el grupo de investigación colaboró en el proyecto bilateral: *Desarrollo de nuevas metodologías para el estudio y análisis integral de materiales cerámicos, vidriados y vidrios del Patrimonio Histórico-Artístico, basadas en AFM, SEM/TEM/EDX, XRF y PIXE, 2003-2006*. Aproximadamente entonces se inició una línea de investigación arqueométrica sobre materiales cerámicos [22]. También se desarrollaron dos proyectos bilaterales entre el CSIC y la Academia Polaca de Ciencias: *Sensores de acidez medioambiental para la conservación preventiva del patrimonio vidriero, 2003-2004* y *Estudio de las alteraciones superficiales de vidrios históricos mediante MFA, 2005-2006*. Estos proyectos se articularon para implementar técnicas analíticas y de observación no destructiva que, sin duda, contribuyeron a mejorar la metodología del estudio de los vidrios históricos, y, por otro lado, avanzar en el estudio de sensores ambientales mediante la realización de medidas de campo.

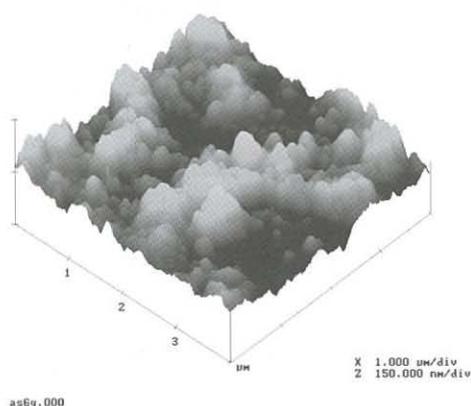


Figura 14. Imagen de MFA de una zona superficial entre cráteres de un vidrio renacentista de la Cartuja de Miraflores (Burgos).

La espectrometría PIXE (proton induced X-ray emission) permitió la determinación de elementos minoritarios, fundamentalmente especies químicas que actúan como cromóforos de los vidrios, así como la composición química y clasificación de los vidrios históricos según

los grupos ya establecidos. Por su parte la microscopía de fuerza atómica (MFA) puso de manifiesto la topografía, rugosidad y estado de conservación de la superficie de los vidrios a un nivel micro y nanométrico (Figura 14). Por esta técnica de observación directa se estudiaron vidrios de muy diversas composiciones, tanto de procedencia histórica como preparados en el laboratorio y envejecidos artificialmente, para efectuar las comparaciones pertinentes [23, 24]. Las principales ventajas de la espectrometría PIXE y de la MFA radican en la ausencia de preparación y manipulación de las muestras, la posibilidad de utilizar muestras sin restricción de tamaño y su carácter no destructivo y no invasivo.

La línea de investigación de sensores continuó con los estudios de campo realizados en Cracovia (Polonia) en el marco del proyecto bilateral antes mencionado. La respuesta de los sensores diseñados y preparados para evaluar la acidez ambiental en distintas zonas de la ciudad se comparó con los datos obtenidos por diversas estaciones meteorológicas convencionales. Los sensores se ubicaron en dichas estaciones y también en el Castillo de Wawel (s. XI), un monumento muy representativo y próximo al río Vístula, donde se esperaba una interacción muy acusada con la humedad ambiental (Figura 15). Efectivamente la respuesta de los sensores ópticos ambientales fue comparable y coherente con los datos meteorológicos y de contaminación registrados por las estaciones. Las evaluaciones se llevaron a cabo utilizando espectrofotometría visible y las correspondientes curvas de calibrado de los sensores [25, 26] (Figura 16).



Figura 15. Estudio de campo realizado en Cracovia (Polonia) con sensores ópticos de acidez. Sensores colocados cerca de piezas históricas de cuero en el Castillo de Wawel (imagen izquierda) y en una estación meteorológica (imagen derecha).

En el periodo 2003-2006 se llevaron a cabo diversos estudios de caracterización arqueométrica integral de vidrios históricos que constituyeron contratos de investigación. El contrato financiado por la empresa restauradora Vidrieras Catedral de León, SL y la Junta de Castilla y León, abarcó los materiales de las vidrieras de la fachada norte de la Catedral de León (s. XIII). Se analizaron vidrios coloreados e incoloros, grisallas, perfiles de emplomado, plomos de sujeción, barras de sujeción, masillas, morteros, soldaduras y la compatibilidad de los materiales originales con los materiales de sustitución [27]. Al tratarse de la fachada norte del monumento, los materiales presentaron patologías específicas como resultado de una intensa interacción con la humedad ambiental (Figura 17).

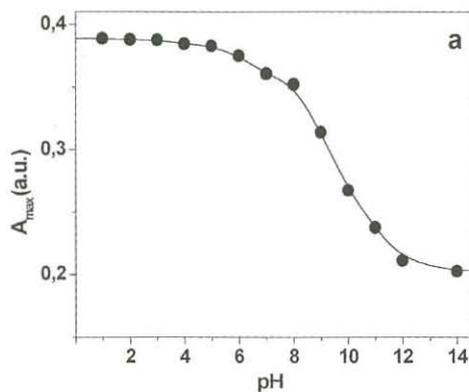


Figura 16. Curva de calibrado de los sensores utilizados en medidas de campo realizadas en Cracovia. Evolución del máximo de la banda de absorción del sensor frente al pH ambiental.

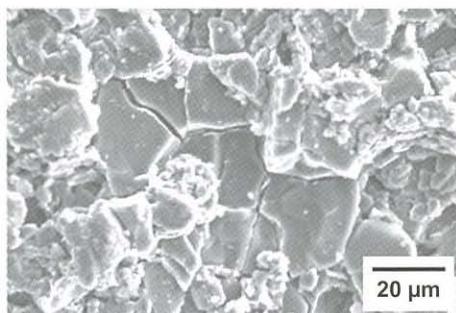


Figura 17. Micrografía de MEB de la costra de corrosión formada por sílice y sulfato cálcico en la cara externa de un vidrio original del s. XIII de la fachada norte de la Catedral de León.

También se estudiaron vidrios procedentes de las vidrieras de la Cartuja de Miraflores de Burgos (s. XV). Además de presentar signos de degradación por ataque químico, estos vidrios se encontraban biodeteriorados. El correspondiente trabajo de caracterización microbiológica [28] se realizó en colaboración con el grupo de investigación *Biodeterioro de Monumentos* del Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CSIC). Se identificaron colonias de hongos (*Aspergillus* y *Labyrinthula*), cuyas hifas se pueden observar en la Figura 18, así como bacterias.

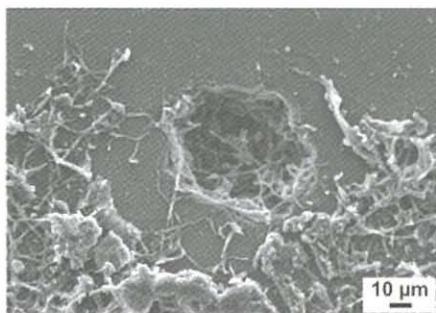


Figura 18. Micrografía de MEBEC de hifas en la superficie y en una picadura de un vidrio procedente de la Cartuja de Miraflores (Burgos).

En el Monasterio de San Juan de los Reyes de Toledo (s. XV) se estudiaron todos los materiales de las vidrieras (vidrios, grisallas, perfiles de enlomado, masillas, etc.). Se establecieron las pautas de limpieza, restauración y conservación preventiva, que fueron particularmente críticas para las vidrieras del presbiterio. Dichas vidrieras son las más antiguas del Monasterio y presentaban numerosas patologías relacionadas con intervenciones anteriores. Las deficiencias que se detectaron determinaron optar por un tratamiento de restauración muy cuidadoso que se evaluó de forma individualizada para cada panel e incluso para cada fragmento de vidrio. La Figura 19 muestra algunas patologías encontradas en la grisalla de estos vidrios.

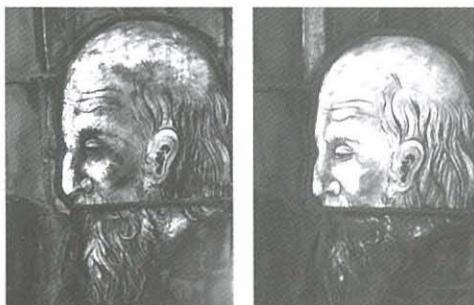


Figura 19. Fragmento de una vidriera del presbiterio del Monasterio de San Juan de los Reyes (Toledo), antes (imagen izquierda) y después (imagen derecha) de la restauración.

El grupo de investigación estudió las vidrieras de la iglesia de San Severino de Balmaseda (s. XV). Los vidrios de estas vidrieras (principios s. XX) presentaban un deterioro intenso en su superficie debido a impactos mecánicos de granos de arena con los que se había procedido a la limpieza de los paramentos de piedra. La Figura 20 ilustra el espectro de esta patología que origina varias deficiencias: pérdida parcial o total de la *grisalla* y otras capas pictóricas, dificultad en la lectura iconográfica del conjunto de la vidriera, pérdida de transparencia y brillo. Estas vidrieras presentaban además otros deterioros originados por actos vandálicos que se traducían en grietas, roturas y faltas de fragmentos de vidrio; desplazamiento de fragmentos de vidrio respecto a la red de emplomado y de paneles respecto al marco de la vidriera; deformaciones y deterioro de las telas metálicas externas de protección, etc.



Figura 20. Fragmento de una vidriera de la iglesia de San Severino de Balmaseda (Bilbao). Se observan huellas de impactos de arena que provocan pérdidas de *grisalla*, otras capas pictóricas, coloración y transparencia.

Finalmente se abordaron dos proyectos del Programa Marie Curie de la Comisión Europea: *Advanced Research Training on the Conservation of Cultural Heritage*, 2005-2006, y *Sol-gel environmental agents sensors. Design, production and characterisation*, 2005-2006. En el primero se completaron parcialmente los estudios de PIXE y de MFA en conjuntos de vidrios históricos de diversas procedencias, y se abordó una investigación sobre las posibilidades analíticas de la técnica LIBS (laser induced breakdown spectrometry) aplicada a la determinación de la composición química de vidrios históricos, vidrios modelo y actuales con diversos porcentajes de PbO [29]. En el segundo proyecto citado se mejoró la tecnología de los sensores de acidez [30, 31] y se amplió para otros nuevos sensores ambientales de respuesta óptica: de luz [32], de humedad relativa [33] y de temperatura [34] (Figura 21).

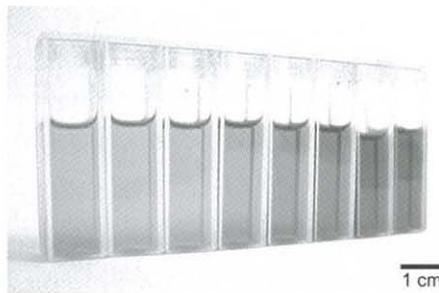


Figura 21. Aspecto de algunos sensores ópticos de temperatura.

De este modo es posible realizar una evaluación ambiental sencilla y completa, controlando los principales parámetros (luz, temperatura, humedad relativa y acidez ambiental) que afectan negativamente la conservación integral de piezas históricas. Estos sensores se basan en la incorporación de una especie química sensible a la variación de cada uno de estos parámetros en una matriz sol-gel. Dichos sensores tienen un bajo coste de producción, son de fácil manejo por personal no especializado y pueden colocarse en lugares de difícil acceso o simultáneamente en varias localizaciones, ya que no necesitan alimentación eléctrica (baterías, cables, conexiones, etc.). La evaluación del correspondiente parámetro ambiental se puede realizar cualitativamente, mediante comparación con una

escala de color, o semicuantitativamente, a través del registro de la respuesta óptica de los sensores por espectrofotometría VIS.

4. PRESENTE Y PROYECCIÓN FUTURA

Desde julio de 2007 el grupo de investigación forma parte del Instituto de Historia en las nuevas instalaciones del Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC, donde se han acondicionado nuevos laboratorios con el equipamiento adecuado para llevar a cabo las tareas experimentales que implican los objetivos científicos del grupo. Los trabajos más recientes que ha abordado el grupo de investigación se insertan en los proyectos y contratos vigentes. Por un lado, se continúa con el diseño y preparación de sensores ambientales (*Sensores químicos basados en recubrimientos híbridos para la protección de materiales metálicos y del patrimonio histórico*, 2006-2009) y, por otro lado, se llevan a cabo diversos estudios relacionados con la arqueometría de vidrios y materiales cerámicos procedentes de varios contextos (de Centro Europa en el marco del proyecto bilateral: *Arqueometría de cerámicas y vidrios de la Edad del Hierro a la Edad Media*, 2007-2008; de la comarca del Bierzo (s. I-II d.C.), correspondiente al proyecto *Paisajes culturales y naturales del Bierzo: Geoarqueología, Paleoambiente y Paleobiología*, 2007-2008 [35] (Figura 22); y de otros yacimientos arqueológicos españoles relacionados con la etapa romana.

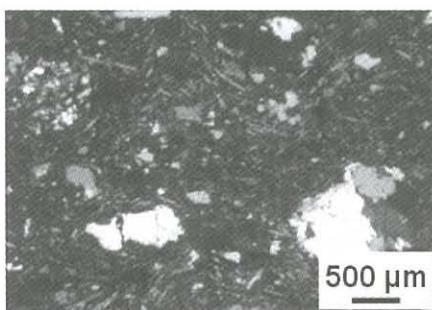


Figura 22. Micrografía de una lámina delgada (nícoles cruzados) de una cerámica arqueológica del Bierzo (León).

La evaluación positiva de la propuesta al Programa Consolider Ingenio 2010, coordinada por Felipe Criado Boado, Coordinador de Área de Humanidades del CSIC, Instituto de Estudios Gallegos Padre Sarmiento, representa la proyección futura inmediata del grupo de investigación. La participación de este grupo (en el que se inserta como colaborador directo el Laboratorio de la Fundación Centro Nacional del Vidrio, Real Fábrica de Cristales de La Granja) en un programa de gran envergadura y duración (cinco años) garantiza el ritmo de actividades científicas y favorece abordar trabajos de investigación desde una perspectiva inter y multidisciplinar. Será posible ejecutar varios proyectos y subproyectos coordinados transversales dedicados a la aplicación de las tecnologías más avanzadas para el estudio arqueométrico y la conservación del Patrimonio Histórico y Cultural. Concretamente el grupo de investigación participa directamente en cuatro proyectos demostradores incluidos en el programa.

En conclusión, el nodo *Conservación integral del patrimonio histórico vidriero* de la Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural, que se corresponde con el grupo de investigación *Arqueometría de Vidrios y Materiales Cerámicos* del Instituto de Historia del CSIC, dispone tanto de los conocimientos técnicos y humanísticos necesarios como de los

medios humanos y materiales idóneos para llevar a cabo estudios científicos arqueométricos de caracterización químico-física, del estado de conservación, de restauración y de conservación básica y preventiva de:

- vidrieras y otros objetos de vidrio de cualquier cronología
- materiales cerámicos de cualquier cronología
- precursores y materias primas de vidrios y de materiales cerámicos
- edificios históricos en los que los vidrios y/o materiales cerámicos suponen un porcentaje elevado
- otros materiales relacionados con objetos de vidrio y de cerámica (elementos de sujeción, especialmente perfiles de emplomado y otros engarces; de decoración como grisallas, esmaltes, dorados, vidriados e incrustaciones)

El grupo de investigación puede, asimismo, desarrollar trabajos de evaluación de microambientes y control de contaminantes ácidos en interiores y exteriores mediante sensores de diseño. También ofrece la posibilidad de síntesis de sensores específicos bajo demanda de particulares, empresas y organismos españoles y extranjeros, a través de contratos de apoyo tecnológico del CSIC.

Las principales actividades científicas del grupo de investigación y su proporción porcentual de dedicación durante los años 2005-2007 son las que se indican en la Figura 23.

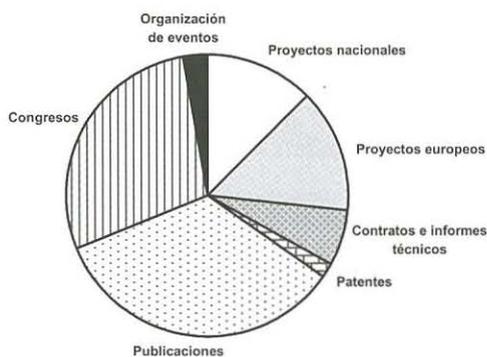


Figura 23. Distribución de actividades científicas del grupo de investigación en el periodo 2005-2007.

5. AGRADECIMIENTOS

Los miembros del grupo de investigación agradecen al Prof. J.M. Fernández Navarro su iniciativa y apoyo constante a la línea de investigación de vidrios históricos, así como su colaboración y enseñanzas. Al Prof. J.M. Rincón López su colaboración en estudios arqueométricos y la cesión de documentación referente a sus estudios pioneros. A la Dra. C. Gil Puente, responsable del Laboratorio de la Fundación Centro Nacional del Vidrio, Real Fábrica de Cristales de La Granja, su cooperación en programas, proyectos, y contratos de investigación, así como su apoyo en tareas experimentales.

6. REFERENCIAS

- [1] Carmona Tejero, N. (2002): *Estudio de los procesos de alteración de vidrieras históricas y de los tratamientos para su restauración y protección*. Tesis doctoral. Universidad de Valladolid.
- [2] Valle, F. J., Ortega, P., Pascual, L., Carmona, N. y Fernández Navarro, J.M. (2002): Chemical composition of medieval stained glasses from the cathedral of León (Spain). *Glass Science and Technology* 75 (3): 152-157.
- [3] García Heras, M., Gil, C., Carmona, N. y Villegas, M.A. (2003): Weathering effects on materials from historical stained glass windows. *Materiales de Construcción* 53 (270): 21-34.
- [4] Carmona, N., Villegas, M.A., Fernández Navarro, J.M. (2005): Corrosion behaviour of $R_2O-CaO-SiO_2$ glasses submitted to accelerated weathering. *Journal of the European Ceramic Society* 25: 903-910.
- [5] Carmona, N., Villegas, M.A. y Fernández Navarro, J.M. (2006): Characterisation of an intermediate decay phenomenon of historical glasses. *Journal of Materials Science* 41(8): 2339-2346.
- [6] Carmona, N., Villegas, M.A. y Fernández Navarro, J.M. (2006): Study of glasses with grisailles from historic stained glass windows of the Cathedral of León (Spain). *Applied Surface Science* 252: 5936-5945.
- [7] Carmona, N., Villegas, M.A. y Fernández Navarro, J.M. (2004): Protective silica thin coatings for historical glasses. *Thin Solid Films* 458:121-128.
- [8] Carmona, N., Villegas, M.A. y Fernández Navarro, J.M. (2006): Sol-gel coatings in the ZrO_2-SiO_2 system for protection of historical works of glass. *Thin Solid Films* 515:1320-1326.
- [9] Villegas, M.A. y Pascual, L. (1999): Sol-gel silica coatings doped with a pH sensitive chromophore. *Thin Solid Films* 351:103-108.
- [10] Villegas, M.A., Pascual, L., Paje, S.E., García, M.A. y Llopis, J. (2000): Eriochrome cyanine doped sol-gel coatings. Optical behavior against pH. *Journal of the European Ceramic Society* 20: 1621-1628.
- [11] Villegas, M.A. y Pascual, L. (2000): Chemical and optical properties of dye-doped sol-gel films. *Journal of Materials Science* 35: 4615-4619.
- [12] García, M.A., Paje, S.E., Villegas, M.A. y Llopis, J. (2002): Preparation and characterization of calcein doped thin coatings. *Applied Physics A* 74: 83-88.
- [13] Villegas, M.A., García, M.A., Paje, S.E. y Llopis, J. (2002): Incorporation and optical behaviour of 4-dimethylaminazobenzene in sol-gel silica thin coatings. *Journal of the European Ceramic Society* 22: 1475-1482.
- [14] Villegas, M.A. (2006): *Procedimiento de encapsulamiento de colorantes orgánicos en un material sólido para la producción de sensores con respuesta óptica, para la medida de la acidez, basicidad o pH de entornos gaseosos, o líquidos, o mixtos sólidos/líquidos*. Oficina Española de Patentes y Marcas, Patente de invención nº P200602403.
- [15] García-Heras, M., Villegas, M.A., Cano, E., Cortés Pizano, F. y Bastidas, J.M. (2004): A conservation assessment on metallic elements from Spanish Medieval stained glass windows. *Journal of Cultural Heritage* 5 (3): 311-317.
- [16] García-Heras, M., Villegas, M.A., Caen, J.M.A., Domingo, C. y García-Ramos, J.V. (2006): Patination of historical stained windows lead comes from different European locations. *Microchemical Journal* 83 (2): 81-90.
- [17] Montero, E.F., García, M.A., Villegas, M.A. y Llopis, J. (2004): Estudio de las propiedades ópticas de recubrimientos porosos sol-gel dopados con fluoresceína en función de la concentración y del pH. *Boletín de la Sociedad Española Cerámica y Vidrio* 43 (1): 8-11.

- [18] Carmona, N., Villegas, M.A. y Fernández Navarro, J.M. (2004): Optical sensors for evaluating environmental acidity in the preventive conservation of historical objects. *Sensors & Actuators A-Physics* 116: 398-404.
- [19] García Heras, M., Rincón, J.M., Jimeno, A. y Villegas, M.A. (2005): Pre-Roman coloured glass beads from the Iberian Peninsula: a chemico-physical characterisation study. *Journal of Archaeological Science* 32 (5): 727-738.
- [20] García Heras, M., Carmona, N., Gil, C. y Villegas, M.A. (2002): Estudio analítico de la araña de la Capilla Palafox (Catedral de El Burgo de Osma, Soria). En *Actas del III Congreso Internacional Restaurar la Memoria*: 431-440. Valladolid: AR&PA / Diputación de Valladolid y Junta de Castilla y León.
- [21] García-Heras, M., Carmona, N., Gil, C. y Villegas, M.A. (2005): Neorenaissance/neobaroque stained glass windows from Madrid: A characterisation study on some panels signed by the Maumejean Frères company. *Journal of Cultural Heritage* 6 (2): 91-98.
- [22] García Heras, M., Reyes Trujeque, J., Ruiz Guzmán, R., Avilés Escaño, M.A., Ruiz Conde, A. y Sánchez Soto, P.J. (2006): Estudio arqueométrico de figurillas cerámicas mayas de Calakmul (Campeche, México). *Boletín de la Sociedad Española Cerámica Vidrio* 45 (4): 245-254.
- [23] García Heras, M., Benítez, J.J., Carmona, N., Sánchez-Soto, P. y Ruiz-Conde, A. (2005): Application of atomic force microscopy to the study of glass decay. *Materials Characterization* 55: 272-280.
- [24] Carmona, N., Kowal, A., Rincón, J.Ma. y Villegas, M.A. (2008): AFM assesment of the surface nano/microstructure on chemically damaged historical and model glasses. *Annali di Chimica-Rome* (Aceptado).
- [25] García-Heras, M., Kromka, K., Faber, J., Karaszkiwicz, P. y Villegas, M.A. (2005): Evaluation of air acidity through optical sensors. *Environmental Science & Technology* 39: 3743-3747.
- [26] García-Heras, M., Gil, C., Carmona, N., Faber, J., Kromka, K. y Villegas, M.A. (2005): Optical behaviour of pH detectors based on sol-gel technology. *Analytica Chimica Acta* 540 (1):147-152.
- [27] Carmona, N., García Heras, M., Robles, A. y Villegas, M.A. (2008): Scientific assessment of the natural weathering submitted by stained glasses from the Cathedral of León (Spain). En *Proceedings of the 17th Congress of Association Internationale pour l'Histoire du Verre*. Amberes. (Aceptado).
- [28] Carmona, N., Laiz, L., Gonzalez, J.M., Garcia-Heras, M., Villegas, M.A. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Biodeterioration of historic stained glasses from the Cartuja de Miraflores (Spain). *International Biodeterioration and Biodegradation* 58:155-161.
- [29] Carmona, N., Oujja, M., Gaspard, S., Garcia-Heras, M., Villegas, M.A. y Castillejo, M. (2007): Lead determination in glasses by LIBS. *Spectroquímica Acta B: Atomic Spectroscopy* 62: 94-100.
- [30] Carmona, N., Garcia Heras, M., Herrero, E., Kromka, K., Faber, J. y Villegas, M.A. (2006): Improvement of glassy sol-gel sensors for preventive conservation of historical materials against acidity. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 45 (5): 321-329.
- [31] Montero, E., García, M.A., Villegas, M.A. y Llopis, J. (2007): Spectral pH dependence of erythrosin B in sol-gel silica coatings and buffered solutions. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. (Aceptado).
- [32] Herrero, E., Carmona, N., Llopis, J. y Villegas, M.A. (2007). Sensitive glasslike sol-gel materials suitable for environmental light sensors. *Journal of the European Ceramic Society* (Aceptado. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.213).
- [33] Carmona, N., Herrero, E., Llopis, J. y Villegas, M.A. (2007): Chemical sol-gel based sensors for evaluation of environmental humidity. *Sensors & Actuators B-Chemistry* (Aceptado. doi: 10.1016/j.snb.2007.03.030).

LA EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA, UN ELEMENTO FUNDAMENTAL DEL PATRIMONIO CULTURAL E HISTÓRICO DE LA CERÁMICA Y EL VIDRIO

C. Pascual, P. Recio, E. Criado, F. Capel, S. Pérez-Villar, F. Rubio, J. Rubio, S. de Aza y F. J. Valle

**Instituto de Cerámica y Vidrio
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Kelsen 5
28049 Madrid**

Resumen. La Arqueometría constituye una línea de actuación transversal del ICV en la que participan distintos grupos de trabajo y departamentos del Instituto, presentándose bajo el epígrafe "La evolución tecnológica, un elemento fundamental del Patrimonio Cultural e Histórico de la cerámica y el vidrio", las actividades de los grupos de investigación del Instituto de Cerámica y Vidrio que participan en la Red del Patrimonio Histórico y Cultural del CSIC.

Desglosada en tres grandes apartados: "La producción de la porcelana en España en el siglo XVIII. Una aproximación arqueométrica", "Caracterización de vidrios romanos, nazaries y renacentistas" y "Coloración de superficies de vidrios medievales mediante amarillo de plata", la investigación llevada a cabo por los distintos grupos de investigación del ICV tiene en común el interés no solo la caracterización de los materiales del Patrimonio en el campo de la Cerámica y el Vidrio sino también la recuperación de la tecnología y el estudio de su evolución histórica como una parte fundamental del Patrimonio Cultural.

En los distintos proyectos llevados a cabo, se ha considerado la aportación de otros centros, especialmente en la evaluación y adecuación de ensayos de caracterización no destructivos, y la colaboración con historiadores, arqueólogos, conservadores y ceramistas. La capacidad acumulada por estos equipos multidisciplinares en el campo de la Cerámica y el Vidrio ha permitido abarcar, además de la caracterización de los materiales históricos y su contextualización, el diseño y procesamiento de los mismos, aportando así una perspectiva global de su disciplina a los desarrollos arqueométricos.

1. LA ARQUEOMETRIA EN EL INSTITUTO DE CERÁMICA Y VIDRIO

Uno de los cambios más significativos en las ciencias sociales en los últimos años ha sido el reconocimiento del papel que el estudio de los materiales antiguos juega en la reconstrucción del contexto histórico y cultural de las civilizaciones [1, 2]. El análisis de los materiales históricos y la identificación de las materias primas y procesos productivos asociados a su fabricación constituyen así un punto fundamental del conocimiento, no solo de los elementos materiales y su conservación, sino también de los orígenes, la evolución en el tiempo y la razón histórica de los bienes del Patrimonio.

Bajo esta consideración, el estudio no solo de las características de los materiales del Patrimonio en el campo de la Cerámica y el Vidrio, sino también la recuperación de la tecnología y el estudio de su evolución histórica como una parte fundamental del Patrimonio Cultural, se presentan aquí las actividades de los grupos de investigación del Instituto de Cerámica y Vidrio que participan en la Red del Patrimonio Histórico y Cultural del CSIC.

La Arqueometría constituye una línea de actuación transversal del ICV en la que participan distintos grupos de trabajo y departamentos del Instituto. A lo largo de los proyectos llevados a cabo, se ha considerado la aportación de otros centros, especialmente en la evaluación y adecuación de ensayos de caracterización no destructivos, y la colaboración con historiadores, arqueólogos, conservadores y ceramistas. La capacidad acumulada por estos

equipos multidisciplinares en el campo de la Cerámica y el Vidrio ha permitido abarcar, además de la caracterización de los materiales históricos y su contextualización, el diseño y procesamiento de los mismos, aportando así una perspectiva global de nuestra disciplina a los desarrollos arqueométricos.

2. HISTORIAL DE LOS GRUPOS

El equipo investigador de Arqueometría Cerámica y Vidriera del ICV comienza el estudio de la porcelana a raíz de la intervención arqueológica que llevó a cabo la Dirección General de Patrimonio Histórico Artístico de la Comunidad de Madrid (1996-1999) en el Parque de El Retiro [3], liderando dos proyectos multidisciplinares de investigación, “Las Cerámicas del Buen Retiro” CAM. 06/01/04/1999 y “Estudio de los pavimentos para el embaldosado de la Casa del Labrador del Palacio de Aranjuez” CAM 06/0112/2002. Los proyectos se centraron en la porcelana elaborada en los años previos a la destrucción de la manufactura (1803-1808), estudiándose fragmentos encontrados en la excavación y restos de baldosas conservados en el Palacio de Aranjuez [4], desveló que durante este periodo y bajo la dirección de Bartolomé Sureda se logró crear una composición de porcelana dura con un alto contenido en magnesio basada en la utilización de la sepiolita, $Mg_4(Si_6O_{15})(OH)_2(H_2O)_2 \cdot 4H_2O$, la llamada tierra de Vallecas en la escasa documentación que recientemente se había recuperado sobre la Fábrica [5]. Se identifican además en los restos una pasta de bario y una porcelana dura caolinítica producida seguramente durante el tercer período [6].

En la acción integrada “La Porcelana de los Borbones, de Capodimonte a El Buen Retiro. ¿Continuidad o innovación?” CSIC-CNR 2004-IT-0036, llevada a cabo en colaboración con el Istituto di Scienza e Tecnologia dei Materiali Ceramici de Faenza [Italia], se abordó el estudio de la porcelana, fundamentalmente restos de vajillas, elaborada en la primera época de la Buen Retiro y su conexión con la fabricada en Capodimonte.

La Arqueometría de la porcelana en Alcora se inicia en 2006 a raíz de la exposición “Un siglo de cerámica de Alcora en el Museo Arqueológico Nacional (1727-1827)”. Los resultados preliminares indican que la pasta de las piezas de vajilla con un alto contenido en SiO_2 se asemeja a la porcelana de Capodimonte (1743-1759) y a la de los primeros años de Buen Retiro (1760-1770), mientras que las piezas de escultura presentan una composición similar a la *bone-ash* inglesa.

Actualmente se realiza el proyecto “Conservación del Patrimonio Nacional Cerámico. Estudio de la evolución científica y tecnológica mediante técnicas analíticas avanzadas de la porcelana en la España del siglo XVIII” Plan Nacional MAT2007/62601, cuyos resultados se incluyen más adelante.

Continuando con el trabajo de investigación en vidrios históricos, el Instituto de Cerámica y Vidrio han incidido en el estudio de distintas épocas del desarrollo del vidrio, romano, nazarí y renacentista, de interés arqueológico en nuestro país.

El grupo de Química física de superficies y procesos ha dedicado los últimos tres años a establecer los conocimientos químico-físicos que rigen la coloración de los vidrios pintados mediante el proceso denominado amarillo de plata. Se han pintado vidrios de diferentes composiciones químicas simulando a aquellas que poseían los vidrios medievales, utilizando distintas sales de plata.

3. TRABAJOS EN CURSO

3.1. La producción de la porcelana en España en el siglo XVIII. Una aproximación arqueométrica

La fabricación de la porcelana en la Europa del siglo XVIII, en un proceso de imitación de la porcelana dura china, constituyó una de las piezas clave de la Revolución Industrial en tanto que supuso un esfuerzo de integración de conocimientos científicos y técnicos, recursos económicos y organizativos sin precedentes y que, en definitiva, significó el salto de una actividad basada en criterios rayanos con la alquimia a una actividad gobernada por los criterios racionales de la Enciclopedia [7].

El afán de obtener la verdadera porcelana china (blanca, translúcida, no porosa y de elevada dureza, inercia química y resistencia al choque térmico) se inicia en Italia a finales del siglo XVI [8], pero no es hasta 1708 cuando en Meissen se descubre y comienza a producir un material con unas características análogas [9]. La composición, 50 % de caolín, 25 % de feldspato y 25 % de cuarzo, y las condiciones de la producción eran básicamente las mismas que se utilizan actualmente [10].

Ante el éxito de Meissen el resto de Europa se embarca en esta empresa [11] aunque el secretismo de las fórmulas, la confusión sobre las materias primas [12] y la complejidad de los procesos eran tales que, en la mayoría de las factorías, lo que se producía eran porcelanas de pasta blanda [13] obtenidas mediante la dispersión de una arcilla blanca y arena en una frita, vidrio, transparente.

En este contexto Carlos III crea la fábrica de Capodimonte (Nápoles) en 1743 que es trasladada con artistas, operarios, maquinaria, moldes e incluso pastas a Madrid en 1759 cuando el rey accede al trono de España, comenzando la producción de Buen Retiro en 1760. Aunque es sobradamente conocido el valor artístico de las dos fábricas [14], no lo son las características tecnológicas de las pastas que permitieron elaborarlas ya sus archivos se perdieron en la destrucción de Buen Retiro durante la Guerra de la Independencia [15]. Menos conocida es la porcelana de Alcora, la fábrica de loza fina que fundó el IX Conde de Aranda en 1727, que produjo porcelana tierna [16-18] e incluso ensayó [19] distintas composiciones en busca de la pasta dura.

3.1.1. La formulación de la porcelana blanda

Desde los pioneros trabajos de Kingery [8] se ha aceptado que, desde la porcelana de los Médici, la pasta blanda se elaboró a partir de una vidrio sodo-cálcico fritado al que se añadía cuarzo finamente molido y una arcilla blanca que daba la plasticidad suficiente para poder moldearla. Esta hipótesis se ha sustentado también en la tradición de la loza fritada que se desarrolló en Inzik [20] a partir del siglo XIV y, sobre todo en la fórmula que recogió Hellet, el primer director de Sèvres, hacia 1752 [21] que incluía una frita formada por arena de Fontainebleau, nitro, sal marina, soda de Alicante, alumbre y yeso. La frita constituía el 70 % de la pasta a la que se añadía calcita y una marga calcárea.

3.1.2. La porcelana blanda de Capodimonte (1743-1759) y Buen Retiro (1760-1770?).

Las observaciones preliminares de los restos de las excavaciones de Capodimonte (1959) y Buen Retiro (1997) mediante difracción de rayos X (XRD) y microscopía de luz reflejada (MOLR) indicaron que todas las muestras, unas veinte, de Capodimonte y algunas, solo cinco, de Buen Retiro presentaban las mismas características mineralógicas. Se constató que en Madrid además de este material y la porcelana de Sureda, por lo menos se elaboraron otros tres tipos de pasta.

Las fases mayoritarias identificadas mediante difracción de rayos X (Figura 1) fueron α -cuarzo y α -cristobalita, polimorfos de baja temperatura de la SiO₂. La tridimita, otra forma de baja de la sílice, aparece solo en algunos casos, lo mismo que algunos silicatos como

wolastonita, dióxido de silicio o anortita. Cabe destacar la presencia de casiterita, SnO_2 , en todos los restos de Buen Retiro y solo en alguno de Capodimonte.

La observación, mediante FE-SEM, en la Figura 2, de la microestructura de la porcelana suministra una información muy valiosa sobre la evolución del material durante el tratamiento térmico. A la izquierda se muestra como la fase vítrea envuelve los granos de sílice. A la derecha se observa con más detalle como la α -cristobalita se forma en el borde de los granos de cuarzo. La transformación desde las formas de alta a las de baja de estas dos fases produce la formación de grietas en el borde de los granos y su propagación en la fase vítrea. También se puede apreciar la casiterita en forma de pequeños cristales inferiores a $0.5\mu\text{m}$.

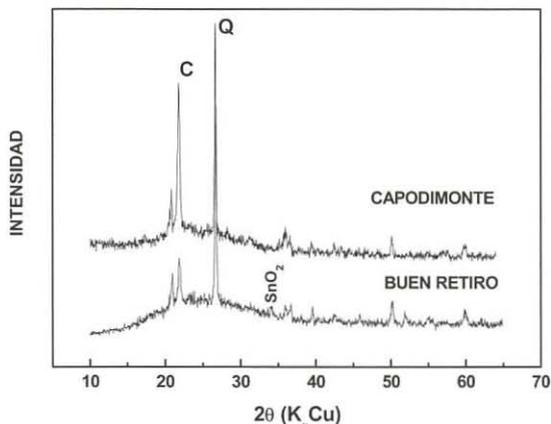


Figura 1. Diffractogramas de dos porcelanas representativas de Capodimonte y Retiro mostrando las fases mayoritarias α -cuarzo (Q) y α -cristobalita (C) y la casiterita (SnO_2) característica de las pastas de Buen Retiro.

Los aglomerados de los silicatos, anortita, dióxido de silicio o wolastonita, aparecen en la matriz de la porcelana y aislados de las fases mayoritarias de sílice. La identificación de cada fase en la microestructura se realizó fundamentalmente por su morfología, confirmándose su composición cualitativa mediante el espectro de energías dispersivas.

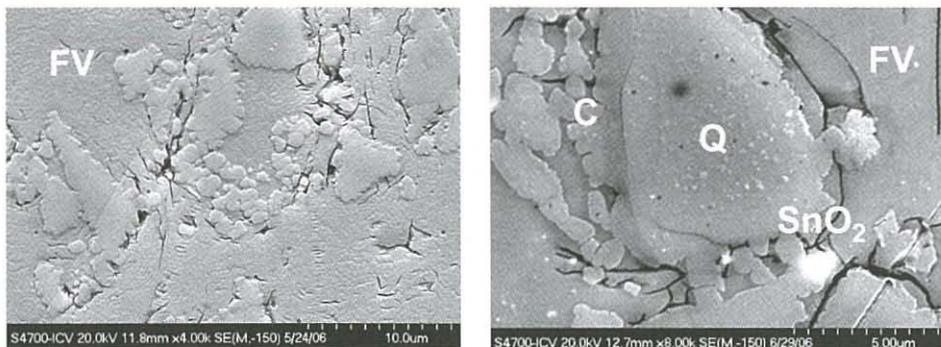


Figura 2. Detalles de la microestructura y fases cristalinas observadas mediante FE-SEM.

El análisis elemental se realizó mediante EDS-SEM tomado en áreas suficientemente representativas ($400 \times 300 \mu\text{m}$) de varios campos de todas las muestras. El microanálisis se

confirmó mediante fluorescencia de rayos X de las composiciones más significativas. En la tabla 1 se recogen la composición promedio de los dos grupos de muestras caracterizados.

3.1.3. La porcelana blanda de Alcora (posterior a 1787)

Lo mismo que en el caso anterior el análisis de las muestras se realizó mediante MOLR, XRD, FE-SEM, EDS-SEM y XRF. Las muestras, solo dos, correspondían a dos tipos de vajillas estilísticamente muy distintas. En este caso, al contrario del anterior, se trataba de piezas museísticas convenientemente autenticadas y documentadas. Los difractogramas de rayos X (Figura 3) que muestran como fases mayoritarias cuarzo y cristobalita, son semejantes a los de las porcelanas de Retiro y Capodimonte. Se aprecia que en la muestra V37, la relación cuarzo / cristobalita es considerablemente mayor que en la V47, aunque esta dispersión se producía también en los casos anteriores. Como fase minoritaria se encuentra dióxido de silicio, silicato de cal y magnesia, que también aparece en algunas muestras de Capodimonte y Retiro.

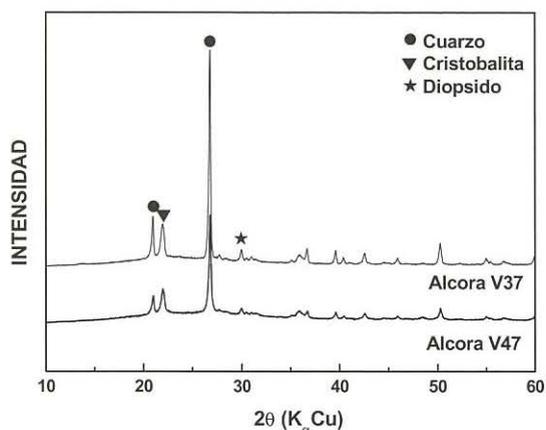


Figura 3. Difractogramas de las muestras de Alcora.

En las microfotografías de la Figura 4 se vuelven a observar la fase vítrea, los granos de cuarzo transformados en cristobalita en los bordes y la formación en mayor proporción, de dióxido de silicio.

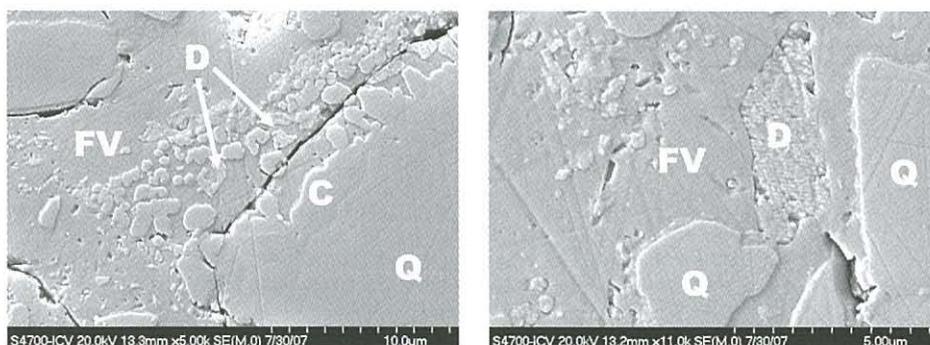


Figura 4. Detalles de la microestructura y las fases más características de las porcelanas de Alcora.

No se detecta la presencia de SnO₂ en la pasta. El análisis elemental, EDS-SEM confirmado por XRF, es prácticamente igual en ambas muestras y similar al de las pastas de Capodimonte y Retiro (Tabla 1).

3.1.4. Interpretación

De acuerdo con la Tabla 1 la composición de las tres producciones, Capodimonte, Buen Retiro y Alcora, es muy similar. En comparación con las porcelanas europeas habría que destacar el alto contenido en sílice, el bajo contenido en CaO y la casi total ausencia de plomo. La más cercana sería la porcelana de Medici [8], diferenciándose las porcelanas francesas por su alto contenido en cal, 12 – 18 % en peso [13], y las inglesas, considerando solo la llamada *glassy porcelain* entre las pastas blandas, por la elevada proporción de plomo [22] y la presencia también de cal.

Tabla 1. Concentración promedio de los óxidos más significativos de las piezas estudiadas.

	Capodimonte	Buen Retiro	Alcora
SiO ₂	82.2	84.4	85.1
Al ₂ O	8.9	6.3	5.1
K ₂ O + Na ₂ O	5.0	3.8	5.0
CaO	1.2	0.7	1.7
MgO	2.3	1.1	2.3
SnO ₂	0.7	1.6	0.1

Las composiciones de las porcelanas francesas son coherentes con la fórmula de de Hellot que refiere d' Albis [21]. Es destacar que la composición en las factorías francesas desde St. Cloud en 1695 hasta Sèvres, que cesó la producción de la porcelana de *pâte tendre* en 1804, apenas presenta variaciones.

En principio la composición y la microestructura de las tres porcelanas analizadas podría asimilarse a la formulación de una pasta en la que interviniera una frita. Apoyando esta hipótesis, especialmente en Buen Retiro y Capodimonte, tendríamos la presencia de SnO₂ en la composición. Se trataría de una frita similar a la empleada los azulejos y la loza de Iznik [20] o a los vidriados de la loza que se preparaban en prácticamente todo el Mediterráneo.

Contraviniendo esta idea, Escrivá de Romaní [16] cita y reproduce una receta de Alcora fechada en 1764 que, aunque fue comprada por dura, corresponde a una porcelana blanda no fritada con un contenido en óxidos muy similar al de las vajillas de Alcora que se han estudiado, dentro de los límites que impone el interpretar la composición de las materias primas naturales,

30 onzas	<i>de piedra clariza de la más fina y limpia, lo que se lavará bien y se secará ...</i>
15 onzas	<i>de cristal de roca, echo lo mismo como con la piedra clariza antezedente ...</i>
5 onzas	<i>de tierra blanca, que esté mui crassa y que en el fuego no mude de color, se lavará mui bien, y si tubiera arena, se quitará ...</i>
15 onzas	<i>de otra calidad de tierra, que tambien es blanca, pero que contiene cal, y nitro, con la que se debe hazer lo mismo como con la antezedente ...</i>
5 onzas	<i>de Borraz de Holanda, que se calzinará sobre una plancha de yerro ...</i>
15 onzas	<i>de piedra alumbre de Holanda, que se calzinará del mismo modo que el Borraz ...</i>

El análisis de los restos de boro, mediante una volumetría con manitol, indica la presencia de este elemento y hace más creíble la utilización de la fórmula sin frita.

Esta interpretación constituye una aproximación. Las conclusiones definitivas requerirán la preparación de las pastas, preferentemente a partir de materias primas naturales, en el laboratorio y el estudio detallado de la evolución de sus fases y microestructuras a la temperatura de cocción.

3.1.5. La formulación de la porcelana magnésica de Sureda

Los estudios arqueométricos llevados a cabo sobre piezas de pavimentos [4], vajilla [6] y escultura fabricados con la porcelana magnésica de la última etapa de Buen Retiro, en los programas CAM. 06/01/04/1999 y CAM 06/0112/2002, se completaron con la reproducción del soporte porcelánico del embaldosado de la Casita del Labrador de Aranjuez.

Recuperación de las fórmulas

La recuperación y publicación del Cuaderno de Notas [5] escrito por el propio Sureda, las recetas manuscritas de Agreda, sucesor de Sureda en la dirección de Buen Retiro, recogidas por Pérez-Villamil [15, 23], así como las cartas del célebre ceramista Brongniart, incluidas en este mismo libro, permitieron recopilar diversas formulaciones y localizar el enclave más probable de las materia prima arcillosa utilizada. Se optó por la siguiente receta, recogida en la página 109 del Cuaderno de Notas de Sureda:

5 partes	<i>Vallecas cocida gran fuego</i>
2	<i>idem. cruda</i>
7	<i>Pedernal de Galapagar</i>
3	<i>Feldespato</i>

Reproducción de las pastas

En la formulación se utilizó sepiolita procedente de de la zona del Cerro Almodóvar que se cree que se encontraba en explotación a finales del siglo XVIII, cuarzo, con pequeñas impurezas de feldespato y micas, y un feldespato potásico con un bajo contenido en albita. Se ensayaron dos temperaturas de calcinación 1150 y 1250 °C para la sepiolita *cocida a gran fuego*. El conformado se realizó mediante prensado uniaxial en seco, sometiéndose las piezas en verde de 6*6 cm a un tratamiento de bizcochado a 1000 °C, previo a la cocción.

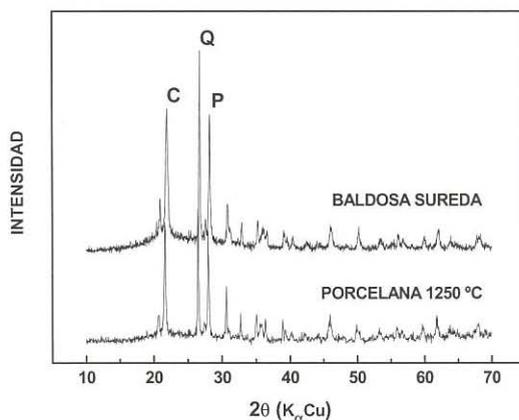


Figura 5. Diffractogramas de rayos X de una réplica de la porcelana magnésica y de una baldosa original de Sureda.

El seguimiento mediante XRD de la evolución mineralógica de las piezas obtenidas en el laboratorio, con la temperatura (1200-1300 °C) y tiempo (2-48 h) de tratamiento, confirma el amplio margen de temperaturas de cocción que admitía la pasta magnésica de Sureda. La utilización arcilla cruda y arcilla cocida en la formulación aseguraba el control de la contracción durante la cocción, de una porcelana siempre constituida por α - cuarzo, α -cristobalita y protoenstatita, como únicas fases cristalinas, mejorándose la blancura de la pieza mediante un tratamiento en ambiente débilmente reductor, que en el laboratorio se simuló en atmósfera de argón. En la Figura 5 se presenta el difractograma de una loseta realizada con la pasta 01 sinterizada a 1250°. Por comparación se presenta el difractograma de una baldosa original.

La porcelana formulada siguiendo la receta propuesta, se encuentra dentro del intervalo de composición de la de las baldosas fabricadas por Sureda para La Casita del Labrador de Aranjuez. En la Figura 6 se han representado en el sistema Sílice –Forsterita – Leucita [24]; las composiciones normalizadas, obtenidas por XRF, de las pastas elaboradas utilizando sepiolita calcinada a 1250 (00) y 1150 °C (01). Ambas pastas, señalas por un círculo, en la Figura 6 se localizan dentro del subsistema Sílice – Feldespato potásico – Enstatita. Por comparación se señala el área de composiciones de las baldosa originales.

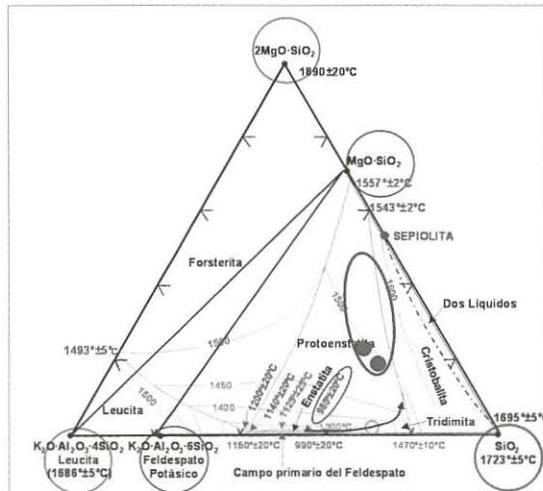


Figura 6. Localización de las pastas preparadas en el laboratorio (círculos) en el subsistema sílice – feldespato potásico – enstatita dentro del sistema Sílice (SiO_2) – Forsterita (MgSiO_4) – Leucita ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$). El área marcada con una elipse corresponde a las composiciones de las baldosas originales.

La Figura 7 muestra una microestructura característica de la porcelana magnésica reproducida. En la fase vítrea (FV) de la matriz, destacan los aglomerados (P-C) de pequeños cristales de hábito acicular de protoenstatita y de α -cristobalita, y los grandes cristales prismáticos, aislados, de protoenstatita (P).

La sepiolita, como otras arcillas magnésicas, descompone en el intervalo 800-900 °C para dar enstatita, MgSiO_3 , de simetría ortorrómbica, que a partir de 1000 °C transforma a protoenstatita, también ortorrómbica. Este proceso es acompañado de la formación de β -cristobalita, que en el enfriamiento transforma a α -cristobalita, que es la fase detectada por XRD. Los aglomerados de protoenstatita - cristobalita mantienen gran parte de su microestructura original cuando el polvo molido de la arcilla calcinada es incorporado a la

pasta. Este material relicto es característico de la microestructura de las baldosas originales de la Casita del Labrador.

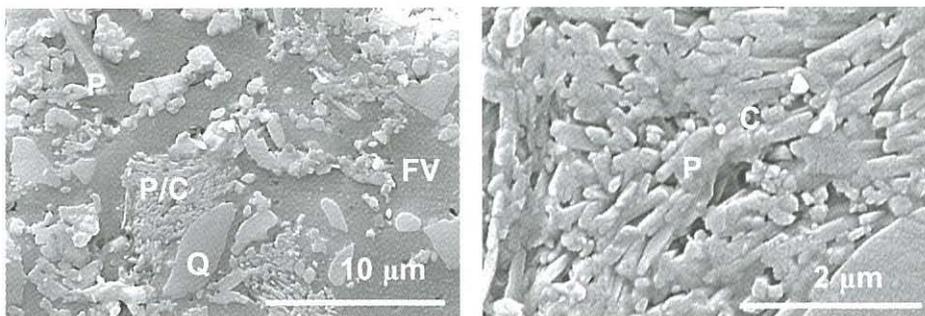


Figura 7. Detalles de la microestructura y las fases más características de la porcelana magnésica.

El control llevado a cabo en las distintas etapas del procesamiento ha permitido reproducir, a escala de laboratorio, piezas de porcelana magnésica de composición química y mineralógica similar a las baldosas fabricadas en Buen Retiro en la primera década del siglo XIX, con microestructuras más homogéneas y menos porosas

3.2 Caracterización de vidrios romanos, nazaries y renacentistas

3.2.1. Estudio y caracterización de los vidrios empleados en la villa romana de Carranque

La villa romana de Carranque fue descubierta, como tantas otras explotaciones agropecuarias del mundo romano, de manera casual cuando, en 1983, se realizaban trabajos agrícolas que pusieron al descubierto uno de sus pavimentos musivos. Desde entonces se han desarrollado, de manera ininterrumpida, excavaciones arqueológicas que culminaron, en 2003, con la creación y apertura al público del Parque Arqueológico de Carranque que se incluye en la red de Parques Arqueológicos de Castilla La Mancha.

El parque arqueológico lo forman la Villa, el Ninfeo y la Basílica. La villa acoge, en sus más de 1200 m², una serie de estancias de marcado carácter residencial – en su mayoría pavimentadas por mosaicos- organizadas en función de un jardín posiblemente porticado – *peristilo* –fuente de luz y ventilación. Se conoce, además de la *cubicula*, cocina, las dos principales salas de representación de la aristocracia tardorromana: el *oecus* – salón – y el *triclinium* – comedor –, amplias habitaciones que impactaban al visitante no sólo por su rica decoración sino por su original forma. Al oeste de estas instalaciones se distribuyeron las estancias rústicas y productivas de la villa – habitaciones de servicio, hornos, depósitos, etc. – que formaban parte de todo establecimiento agropecuario.

El objetivo fundamental de este trabajo ha sido la caracterización microestructural y microquímica de algunos vidrios empleados en la técnica musivaria de la Villa de Carranque. El vidrio se utilizaba en aquellas partes del mosaico en donde el artista quería resaltar la silueta que da forma a la figura.

De las observaciones por TLOM en lámina delgada y por SEM se deduce que los vidrios analizados presentan una falta de homogeneidad, que es muy común en vidrios de esta época.

De los resultados del microanálisis realizado por microsonda electrónica de barrido (EPMA) se deducen, atendiendo a su composición, cuatro familias principales de vidrios clasificados por su tonalidad: verdes, negros, rojos y amarillos (Figura 8).

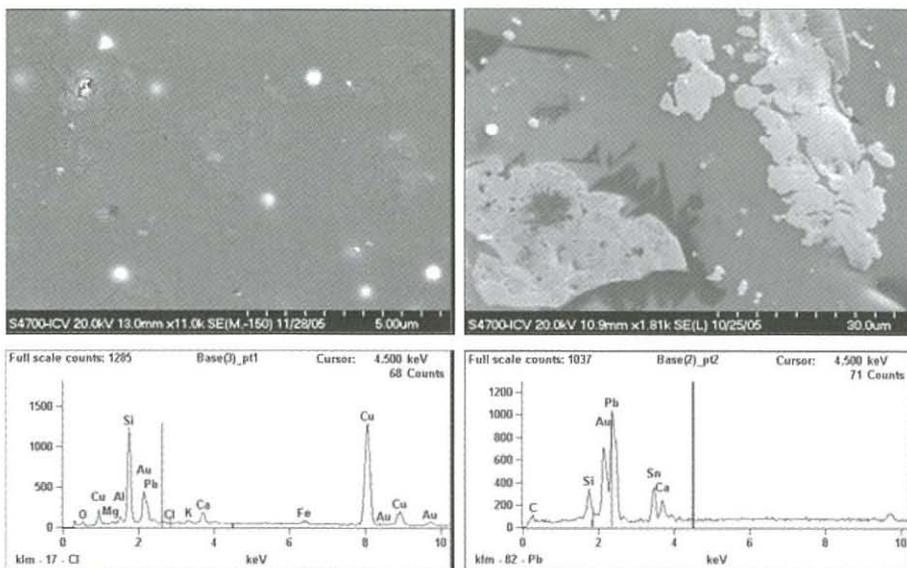


Figura 8. Observación y microanálisis por EPMA de los vidrios de color rojo (izquierda) y de color amarillo (derecha) de la villa romana de Carranque.

Los estudios analíticos por FE-SEM-EDS/WDS permitieron determinar que los vidrios de color amarillo se caracterizan por la utilización de compuestos de plomo-estaño (XRD; $Pb_2Sn_2O_6$); los vidrios rojos por la utilización de minerales complejos de cobre; los vidrios de coloración negra por compuestos de hierro y/o manganeso y los vidrios verdes en sus distintas tonalidades por la relación de óxido ferroso (azul) y óxido férrico (amarillo).

3.2.2. Yacimiento arqueológico del conjunto monumental de la Alcazaba de Almería

La Alcazaba de Almería forma, junto al lienzo de muralla del cerro de San Cristóbal, uno de los más impresionantes conjuntos medievales de Al-Andalus. La envergadura y complejidad de sus defensas es consecuencia de las funciones que tuvo como residencia y expresión formal de la autoridad que gobernaba una ciudad que alcanzó gran importancia económica y estratégica durante la Edad Media. Fue el puerto del califato y posteriormente capital de un reino taifa.

Una serie de piezas y de fragmentos de vidrio fueron encontrados durante la excavación de una zona de acceso al complejo palacial de este Conjunto. Varios de dichos fragmentos han sido analizados por varias técnicas espectroscópicas tales como espectrometría de emisión de plasma (ICP-OES), XRF, XRD, MET y SEM para conocer su microestructura y composición química. Debido al largo periodo de tiempo de enterramiento, algunos vidrios han sufrido un fuerte proceso corrosivo dando lugar, en algunos casos, a estructuras de tipo laminar. Los vidrios aparecieron en el yacimiento arqueológico junto con otras piezas y restos de cerámica que están datadas en la época Nazarí, Siglos XIII - XV.

El objetivo del trabajo es dar a conocer el importante número y diversidad de piezas documentadas en el Conjunto Monumental de la Alcazaba y caracterizar los vidrios recuperados, desde el punto de vista de su composición, formas y color.



Figura 9. Piezas encontradas en el yacimiento arqueológico de la Alcazaba de Almería.

Del total de fragmentos y piezas excavadas, sólo se han analizado algunas atendiendo fundamentalmente a su color. También se ha caracterizado uno de los trozos de vidrio que presenta una decoración superficial (aplicación) con hilos del mismo material. En general, casi todos los vidrios excavados presentan un grado más o menos intenso de corrosión. En la Figura 9 se muestran dos de las piezas encontradas.

Los vidrios se han observado por RLOM/T para visualizar el aspecto que presenta su superficie así como las distintas capas de corrosión. También mediante microscopía óptica de transmisión se ha podido observar defectos internos del vidrio como son incrustaciones en la masa, inhomogeneidades y burbujas.

El análisis químico de los vidrios se ha realizado por vía húmeda (gravimetría e ICP-OES) seleccionando varias muestras de colores diferentes y por IBA [25]. Para evitar la posible influencia de las capas o costras de los vidrios, éstas se han limpiado superficialmente, previamente a su análisis, disolviendo dichas costras en ácido clorhídrico diluido y analizando posteriormente la disolución resultante de este ataque para conocer su composición.

Son vidrios de alto contenido en Na_2O , alrededor del 15 % en peso y bajo contenido en K_2O (2-3%). Contienen hierro y manganeso como responsables de la coloración verdosa de muchos de ellos. La presencia de pequeñas cantidades de cobalto y o cobre son los responsables de la coloración azulada. Los vidrios medievales citados por Brill [26], presentan contenidos semejantes de SiO_2 , Na_2O , Al_2O_3 , K_2O y CaO , sin embargo contienen menos hierro que los analizados en este trabajo.

Mediante SEM-EDS se ha estudiado la microestructura de algunos vidrios con objeto de observar, fundamentalmente, el proceso corrosivo sufrido durante su enterramiento, utilizando tanto la observación de la superficie del vidrio como su sección transversal. Según Cox [27], la distancia entre intercapas es de unos 2-15 μm en vidrios potásicos y de 1 μm aproximadamente en los vidrios sódicos. En los vidrios estudiados, con alto contenido en sodio (15 %), la distancia de espaciado entre láminas de corrosión ha sido de 1 μm . En la Figura 10 se puede observar la estructura laminar que presentan los vidrios que han sufrido un proceso corrosivo.

Por asimilación con otros restos de piezas cerámicas aparecidas en el yacimiento, se puede datar las piezas de vidrio como pertenecientes al periodo Nazarí (siglos XIII-XV).

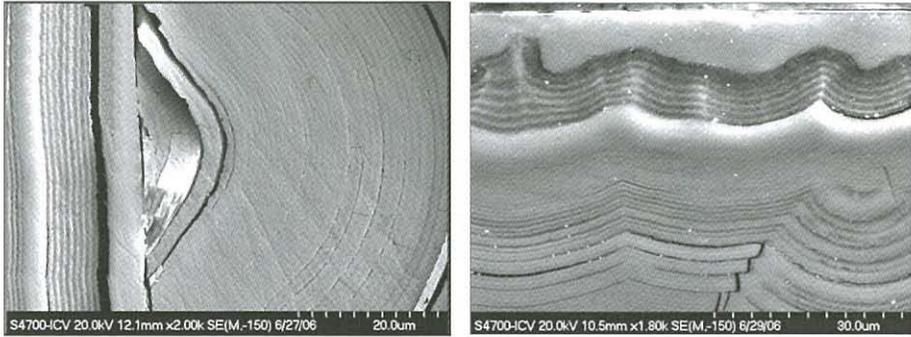


Figura 10. Corrosión de los vidrios de la Alcazaba de Almería. Paralela a la superficie y circular (micrografía FE-SEM izquierda) y. ondulada y paralela a la superficie del vidrio (derecha).

La mayor parte de los vidrios han sufrido transformaciones tanto físicas como químicas. Los vidrios presentan superficies iridiscentes por reflexión debido a la alteración superficial que han sufrido durante su enterramiento. En algunos casos, presentan frentes de corrosión dando lugar a estructuras multicapas con morfologías complejas.

Las composiciones de los principales elementos del vidrio que presentan los fragmentos analizados se corresponde bastante bien con composiciones de vidrios medievales recopiladas en la literatura.

3.2.3. Caracterización de vidrios renacentistas localizados en Talavera de la Reina

La Iglesia Colegial de Talavera de la Reina es un edificio emblemático de la ciudad, de origen mudéjar y acabado gótico, renovado en profundidad a finales del siglo XVI, coincidiendo con el apogeo de la ciudad como centro productor de cerámica. En el transcurso de una intervención arqueológica se han encontrado más de 3200 fragmentos de vidrio plano transparente, con espesores de alrededor de 2 mm, y de diversas coloraciones: ámbar, azules de diferentes tonalidades, verdes y rojo rubí. La calidad de los vidrios es notable, con espesores homogéneos, elevado brillo, baja presencia de infundidos y defectos y pocas burbujas, con tamaños entre 0,1 y 5 mm. Se ha analizado la composición química por XRF, caracterizando su color mediante Espectrofotometría UV-Visible; asimismo se han estudiado los procesos de corrosión por XRD a ángulo rasante, SEM-EDS y RLOM.

Los vidrios se agrupan en dos tipologías diferenciadas por su composición química (Tabla 2 y Figura 11). Pertenecen al Grupo I un vidrio ámbar oscuro y otro azul intenso y se incluyen los siete restantes, con un amplio abanico de coloraciones, en el Grupo II. Los elementos colorantes utilizados son Fe_2O_3 , introducido como impureza de las arenas y también para fabricar el ámbar reducido, MnO , CuO , precursor de vidrios verdes y rubí y CoO , precursor del azul de cobalto.

Tabla 2. Composición química de los vidrios por Fluorescencia de Rayos X, Grupo I (1-2) Grupo II (3-8).

	1	2	3	4	5	6	7	8	Batalha
Cr ₂ O ₃	0.001	0.002	0.004	0.001	0.006	0.04	0.004	0.004	
ZrO ₂	0.035	0.041	0.031	0.028	0.041	0.025	0.027	0.03	
SO ₃	0.32	0.29	0.26	0.23	0.15	0.15	0.21	0.14	
ZnO	0.038			0.34	0.034		0.033	0.037	
SrO	0.081	0.089	0.073	0.32	0.084	0.074	0.11	0.077	0.09
BaO	0.49	0.65							0.25
Bi ₂ O ₃		0.063				0.11			
Cl			0.65	0.42	0.56	0.75	0.52	0.62	
As ₂ O ₃			0.18			0.32			
Co ₃ O ₄		0.085	0.035			0.21		0.038	
CuO				1.15			0.097		
PbO				0.058					
CaO/K ₂ O	0.99	1.63	4.31	3.82	4.67	4.62	4.69	3.95	>4
Espesor mm	1.8	2.2	1.7	1.7	2	2.3	2.2	2	
Color	Ambar	Azul	Azul	Verde	Ambar	Azul	Rubi	Incoloro	

La composición de los vidrios del Grupo I se asemeja a la de los vidrios medievales con CaO/K₂O < 2, mientras que los del Grupo II, más cercanos a los vidrios renacentistas, presentan diferencias significativas respecto a los referenciados en la bibliografía [28-31]. En cuanto al contenido de alcalinos, las diferencias entre ambos grupos son muy significativas: Grupo I: 10 – 17 % K₂O, 0.3 % Na₂O, Grupo II: 4.8 – 5.5 % K₂O, 1.9 – 2.1 Na₂O. En cuanto a los niveles de CaO, las diferencias son menos acusadas: Grupo I: 16 - 19 % CaO; Grupo II: 20 - 23 % CaO.

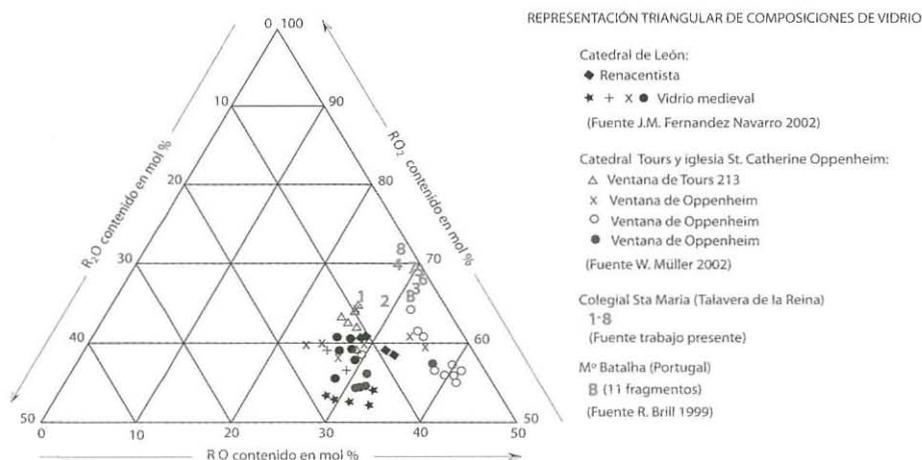


Figura 11. Representación triangular de la composición de los vidrios (mol %), de acuerdo con el esquema propuesto por Illife [30]: Vidrios medievales [30-33]. Vidrios Renacentistas [trabajo presente y 26].

Los vidrios del Grupo II se asemejan químicamente a los utilizados en el Monasterio de Batalha (Portugal) durante las restauraciones llevadas a cabo en el S. XVI [33]. La proximidad geográfica y las obras de reconstrucción coetáneas efectuadas en dicho Monasterio y en la Colegial de Santa María, apoyan la hipótesis de un origen común a ambos tipos de vidrio. La composición no se corresponde con la de vidrios españoles de la época, siendo su origen más probable Alemania.

3.3 Coloración de superficies de vidrios medievales mediante amarillo de plata

El grupo de Química física de superficies y procesos comenzó sus actividades hace tres años desarrollando el pigmento denominado "amarillo de plata" de acuerdo a las especificaciones recogidas en el libro de "El Lapidario" de Alfonso X El Sabio". Este pigmento se obtuvo a partir de plata metálica en el laboratorio a más de 250 °C y durante varias horas de reacción. Posteriormente el pigmento se molturó en molino de alúmina y se utilizó para pintar vidrios. Además de este pigmento también se ha utilizado otra sal de plata comercial.

Por otro lado, como vidrios para pintar se han utilizado tres distintos obtenidos en el laboratorio en horno de fusión de gas a unos 1500 °C y cuyas composiciones químicas eran similares a los utilizados en la época medieval. Estos vidrios están caracterizados por la presencia de concentraciones relativamente moderadas de elementos alcalinos (Na y K), así como por temperaturas de transformación diferentes.

Una vez obtenidos tanto los pigmentos como los vidrios adecuados se procedió al pintado del éstos últimos por aquellos utilizando las mismas técnicas y procedimientos mencionados en libros antiguos. Para ello se seleccionaron diferentes arcillas, aglomerantes y líquidos dispersantes de acuerdo a tales tratados. Se han estudiado cómo influyen diferentes variables en el color obtenido, variables tales como la concentración de arcilla y/o aglomerantes- dispersantes, temperatura, tiempo de tratamiento y velocidad de calentamiento [34].

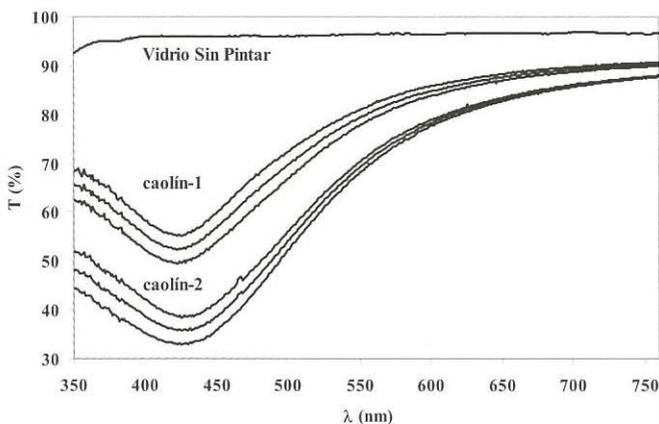


Figura 12. Espectros Visibles de vidrios pintados con Amarillo de Plata.

Los vidrios pintados con "amarillo de plata" se han caracterizado mediante diferentes técnicas experimentales. Así se ha utilizado la espectroscopia visible para la determinación del color y el cálculo del tamaño de los nanoclusters de plata. Las espectroscopias infrarroja (FT-IR) y Raman se han empleado para la determinación de la estructura de los vidrios y los cambios producidos en dicha estructura después de haberse producido el intercambio iónico entre los iones plata y los iones alcalinos del vidrio. Mediante microscopía electrónica de

barrido (SEM-EDS) se han determinado los perfiles de difusión de los iones plata, mientras que mediante microscopía electrónica de transmisión (usando réplicas así como ion thinning) se han observado los coloides y las agrupaciones de éstos [35].

Los vidrios pintados con “amarillo de plata” muestran todos ellos unos espectros visibles característicos en los que se aprecia una banda de absorción situada a 420 nm que aumenta en intensidad al aumentar el color amarillo del vidrio. En la figura 12 se muestran varios espectros de un mismo vidrio pintado con “amarillo de plata”. La citada banda es característica de nanopartículas de plata metálica formando coloides dispersos o agregados. La intensidad de esta banda depende de muchos factores tales como tipo y concentración de pigmento, tipo de arcilla, tipo de vidrio, temperaturas de tratamiento, etc. En el caso concreto de esta Figura 12 se observa como pintando con dos arcillas distintas (en este caso caolines) se obtienen coloraciones diferentes para tres concentraciones similares de sal de plata. Sin embargo dado que influyen numerosos factores en el color amarillo final, no es posible obtener una única correlación.

A partir de los espectros visibles se pueden calcular las componentes del color de cada vidrio de acuerdo a las especificaciones de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE Lab). Así se obtienen los valores de L^* (luminosidad) y color, a^* y b^* (donde: $-a^*$ = verde, $+a^*$ = rojo, $-b^*$ = azul, $+b^*$ = amarillo). Representando los valores del color amarillo en función de diferentes variables de las arcillas utilizadas para el pintado se observa como b^* aumenta con la superficie específica y con el tamaño de poro de la arcilla (Figura 13).

A partir de las bandas de absorción visible (Figura 12) se puede calcular el tamaño de los coloides de plata formados tras el tratamiento térmico. Los valores obtenidos están alrededor de los 5 – 10 nm. No obstante es preferible observar estos coloides mediante microscopía electrónica de transmisión tal y como se muestran en la Figura 14, para tres vidrios pintados en los que se ha obtenido diferente tonalidad amarilla.

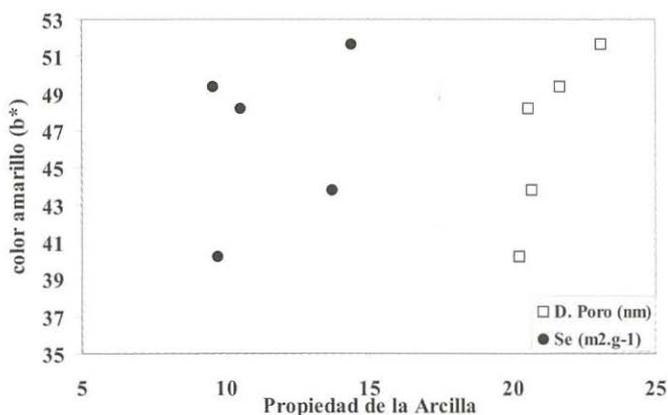


Figura 13. b^* en función de la Superficie específica y tamaño de poro de la arcilla.

La formación de estos coloides de plata dentro del vidrio se debe a un proceso de intercambio iónico entre los iones plata de la sal y los iones alcalinos del vidrio. En este intercambio se produce la difusión de los iones plata hacia el interior del vidrio. En la figura 15 se muestran los perfiles de difusión de plata obtenidos mediante EDS para tres vidrios pintados en los que se han utilizado diferentes arcillas. Puede observarse como la distancia recorrida por los iones Ag es diferente según el tipo de arcilla aunque en los tres casos se haya utilizado la misma relación arcilla/pigmento. Este resultado indica que las

características de la arcilla, como son su tamaño de partícula y en especial la superficie específica y tamaño de poro, son determinantes en la difusión de plata hacia el interior del vidrio.

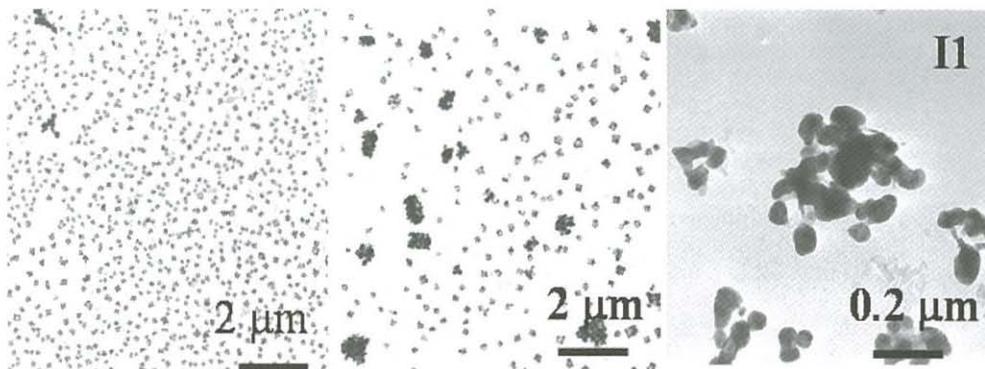


Figura 14. MET de coloides en vidrios pintados con "Amarillo de Plata".

Por otro lado, se ha comprobado sin embargo que el color de los vidrios pintados con amarillo de plata no depende de la profundidad de difusión de plata en el vidrio sino que depende de la concentración de plata en los primeros 3-5 micrómetros de espesor. Así, en la Figura 15 los vidrios pintados poseían colores similares a pesar de que la distancia recorrida por los iones Ag fue distinta en cada caso (40, 50 y 70 μm).

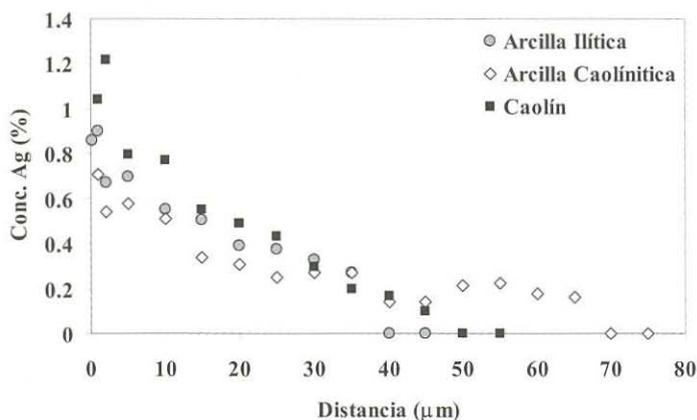


Figura 15. Perfiles de difusión de Ag en vidrios pintados con Amarillo de Plata.

La difusión de los iones Ag durante el tratamiento térmico puede producir cambios en la estructura del vidrio. Se supone que estos iones sustituyen a los respectivos alcalinos (K y Na) del vidrio y, en principio, no debería existir ningún tipo de modificación estructural. Este fenómeno se ha estudiado mediante espectroscopia IR y Raman, ambas utilizando la técnica de reflexión. Dado que la primera presenta bandas más anchas y solapadas que la segunda, ha sido ésta la más utilizada en los estudios correspondientes. En la Figura 16 se muestra varios espectros Raman de vidrios pintados con Amarillo de Plata y en los que la coloración ha sido diferente. Puede observarse cómo la presencia de plata modifica los espectros Raman indicando la posible modificación estructural del vidrio.

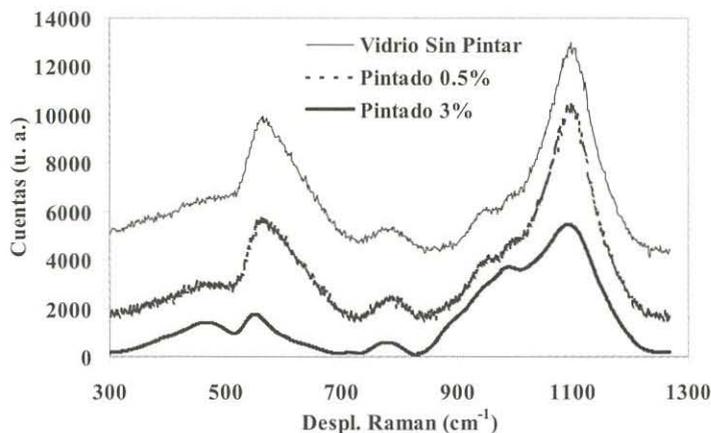


Figura 16. Espectros Raman de Vidrios Pintados con Amarillo de Plata.

El grado de modificación se puede determinar analizando las bandas Raman correspondientes a las vibraciones de deformación o de tensión de los enlaces Si-O de la red vítrea. Dicho grado de modificación se conoce como índice de polimerización el cual se ha definido una vez analizados numerosos vidrios antiguos y medievales obtenidos de diferentes procedencias o yacimientos. Mediante este índice se ha llegado a conclusiones importantes como es el poder establecer el siglo en el cual se obtuvo el vidrio según sea el valor del índice de polimerización. No obstante, teniendo en cuenta que dicho índice depende de la relación entre bandas Raman y que la presencia de nanopartículas en las proximidades de oxígenos no puente puede aumentar la señal Raman de dichos enlaces (el conocido efecto SERS), no es posible asegurar a ciencia cierta si los espectros Raman sirven para realizar los estudios estructurales de los vidrios pintados con Amarillo de Plata. En estos momentos nuestro grupo se está llevando a cabo toda una serie de análisis sobre este tema en particular.

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

El grupo dedicado a la Arqueometría Cerámica y Vidriera del ICV lleva a cabo actualmente el proyecto "Conservación del Patrimonio Nacional Cerámico. Estudio de la evolución científica y tecnológica mediante técnicas analíticas avanzadas de la porcelana en la España del siglo XVIII" Plan Nacional MAT2007/62601. Lo mismo que en los proyectos anteriores se ha formado un grupo multidisciplinar que aporta una amplia experiencia y especialización en el diseño experimental y la aplicación de técnicas instrumentales (XRF, ICP, XRD, FE-SEM, TEM, IR, etc.) de caracterización y la evaluación y adecuación de técnicas no destructivas, como la emisión de rayos X inducidos por partículas α -PIXE [36] o la fluorescencia de rayos X portátil que permiten la caracterización de los materiales tanto *in situ* como en piezas no fragmentadas. La aplicación de de la fisico-química del estado sólido y las interfaces, la termodinámica y la reactividad a elevada temperatura, los diagramas de fases en equilibrio, la relación estructura propiedades, comunes a los desarrollos de los materiales cerámicos avanzados aporta los elementos necesarios para identificar y recuperar la tecnología de la porcelana en el siglo XVIII. Como en los desarrollos anteriores, en el planteamiento multidisciplinar del proyecto destacan la participación del Museo Arqueológico Nacional y la recuperación de los documentos históricos relativos a la producción de la porcelana.

El grupo ha recuperado la investigación de algunos vidrios históricos. La recuperación de la tecnología de estas producciones y formará parte de los futuros proyectos de esta línea apoyados en estas primeras caracterizaciones.

El grupo de Química física de superficies y procesos ha llegado a resultados importantes en cuanto al conocimiento de las técnicas de pintado con Amarillo de Plata que se proyectan internacionalmente en las relaciones con la Universidad Pierre et Marie Curie de París, en donde se estudian vidrios y cerámicas pintadas antiguas. Actualmente se lleva a cabo el proyecto "Liposas de termofilos: Caracterización e inmovilización-estabilización sobre nuevos materiales. Aplicación en bioindustria química sostenible" Plan Nacional CTQ2006-15692-C02-02 que considera como parte fundamental los procesos de recubrimiento en el vidrio.

5. AGRADECIMIENTOS

El trabajo realizado sobre la porcelana en el s. XVIII ha sido posible gracias al Plan Nacional, Proyecto MAT2007/62601, y a las muestras cedidas por la Comunidad de Madrid, Patrimonio Nacional y el Museo Arqueológico Nacional. El grupo de trabajo desea mostrar su agradecimiento a los componentes de estos Organismos y especialmente a D^a Carmen Mañueco, Conservador - Jefe del Departamento de Edad Moderna del Museo Arqueológico Nacional por el continuo asesoramiento en la selección de las muestras estudiadas y en los aspectos documentales, históricos y artísticos de las producciones. También agradecer a la empresa Tolsa su apoyo al proyecto y el suministro de la sepiolita de Vallecas utilizada en la reproducción de las pastas.

La investigación en la caracterización de vidrios de la Alcazaba de Almería ha sido financiada por el Proyecto HUM-493 de la Consejería de Innovación, Ciencia y Tecnología de la Junta de Andalucía.

La investigación en vidrios pintados ha sido financiada por el Plan Nacional Proyecto CTQ2006-15692-C02-02. Así mismo los autores agradecen a la empresa CPA, S. A., la ayuda aportada en estos trabajos.

6. REFERENCIAS

- [1] Sillar, B. y Tite, M.S. (2000): The challenge of 'technological choices' for materials science approaches in archaeology. *Archaeometry* 42 (1): 2-20.
- [2] Vanviver, P.B. (2001): Preserving art through the ages. *MRS Bulletin* 26 (1): 13-60.
- [3] Marín, F.J., Mena, P., Vigil-Escalera, A., Yáñez-Santiago, G.I., Kermovant, A. y Lorenzo, J.L. (1999): La intervención arqueológica en el Parque de El Retiro (Huerto del Francés). En *Catálogo de la Exposición de Porcelanas del Buen Retiro*:129-144. Madrid: Museo Arqueológico Nacional.
- [4] Pascual, C., Recio, P., Aza, S. de, Valle, F.J., Criado, E., Aza, A.H. De y Martínez, R. (2006): The last period of Buen Retiro porcelain factory. En R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras y C. Martin-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 135-141. Londres: Taylor & Francis.
- [5] Sureda Miserol, Bartolomé (2000): *Cuaderno de notas sobre cerámica. 1802-1826*. Ed. J. Sierra Alvarez e I. Tuda Rodríguez. Madrid: Museo Municipal.
- [6] Aza, A.H. De, Torre A.G. de la, Aranda M.A.G., Valle, F.J. y Aza, S. de. (2004): Rietveld quantitative analysis of Buen Retiro porcelains. *Journal of the American Ceramic Society* 87 (3): 449-454.

- [7] Klein, U. (2004): Beyond the ivory tower: Not a pure science: Chemistry in the 18th and 19th centuries. *Science* 306 (5698): 981-982.
- [8] Kingery, W.D. (1984): Medici porcelain. *Faenza* 70 (4): 441-453.
- [9] Schonfeld, M. (1998): Was there a western inventor of porcelain?. *Technology and Culture* 39 (4): 716-727.
- [10] Iqbal, Y. y Lee, W.E. (2000): Microstructural evolution in triaxial porcelain. *Journal of the American Ceramic Society* 83 (12): 3121-3127.
- [11] Reed, I.H. (1936): The European hard-paste porcelain manufacture of the eighteenth century. *The Journal of Modern History* 8 (3): 273-196.
- [12] Pound, N.J.G. (1948): The discovery of china clay. *The Economic Historic Review, New Series* 1 (1): 20-33.
- [13] Kingery, W. D. y Smith, D. (1985): The development of European soft-paste (frit) porcelain. En W.D. Kingery (ed.) *Ancient Technology to Modern Science. Ceramics and Civilisation*. Vol. I: 273-291. Columbus (Ohio): The American Ceramic Society.
- [14] Mañueco, C. (1999): *Catálogo de la Exposición de Porcelanas del Buen Retiro*. Madrid: Museo Arqueológico Nacional.
- [15] Pérez-Villamil, M. (1904): *Artes é industria del Buen Retiro*. Madrid: Sucesores de Rivadeneyra.
- [16] Escrivá de Romani, M. (1945): *Historia de la cerámica de Alcora*. Madrid: CSIC.
- [17] Todolí Pérez de Leon, X. (1998): Nuevas aportaciones al estudio de la Real Fabrica de Loza de Alcora. *Forum Cerámico* 7: 1-77.
- [18] Pascual, C., Recio, P., Aza, A.H. De, Aza, S. De, Criado, E. y Mañueco, C. (2006): Análisis fisico-químico, mineralógico y microestructural de porcelana de la Manufactura de Alcora. En E. Mañueco (ed.) *Un Siglo de Cerámica de Alcora en el Museo Arqueológico Nacional*: 153-155. Madrid: Museo Arqueológico Nacional.
- [19] Mañueco Santurtún, C. (2005): *Catálogo de la exposición Cerámica de Alcora (1727-1827)*. Segovia: Caja Segovia.
- [20] Henderson, J. y Raby, J. (1989): The technology of fifteenth century Turkish tiles: An interim statement of the origin of the Iznik industry. *World Archaeology* 21 (1): 115-132.
- [21] D' Albis, A. (1997): Making soft past in the XVIII century. *Key Engineering Materials* 132-136: 1432-1433.
- [22] Tite, M.S. y Bimson, M. (1991): A technological study of English porcelains. *Archaeometry* 33 (1): 3-27.
- [23] Mañueco, C. (2000): Aportaciones sobre la composición de los esmaltes, barnices y pastas de la porcelana de El Buen Retiro. Nuevos datos documentales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 39: 182-186.
- [24] Luth, W.C. (1967) : The system $\text{KAlSiO}_4 - \text{Mg}_2\text{SiO}_4 - \text{KAlSi}_2\text{O}_6$. *Journal of the American Ceramic Society* 50: 174-176.
- [25] Respaldiza, M.A., Ortega Feliu, I., Gomez-Tubío, B., Capel, F., Suarez, A., Barba, F., Arias, F., y Alcalá, F. (2007): IBA Characterisation of glasses from the archaeological site of "La Alcazaba de Almería", Almería (Spain). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 260: 329-335.
- [26] Brill, R.H. (1999): *Chemical analyses of early glasses, vol. 2*. Corning (New York): The Corning Museum of Glass.

- [27] Cox, G.A. y Ford, B.A. (1993): The corrosion of glass by ground-water. *Journal of Materials Science* 28 (20): 5637-5647.
- [28] Muller, W., Torge, M. y Adam, K. (1994): Ratio of $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O} > 2$ as evidence of a special Renish type of Medieval stained glass. *Glastechnische Berichte* 67 (2): 45-48.
- [29] Muller, W. (1992): Corrosion Phenomena of Medieval Stained Glasses. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 31 (1): 219-239.
- [30] Stern, W. B. y Gerber, Y. (2004): Potassium - calcium glass: New data and experiments. *Archaeometry* 46 (1): 137-156.
- [31] Valle, F.J., Ortega, P., Pascual, L., Carmona, N. y Fernández Navarro, J.M. (2002): Chemical composition of Medieval stained glass from the cathedral of Leon (Spain). *Glass science and technology* 75 (3): 152-157.
- [32] Illife, C.J. y Newton, R.G. (1976): Using triangular diagrams to understand the behaviour of Medieval glasses. *Verres et Refractaires* 30 (1): 30-34.
- [33] Vilarigues, M. y da Silva R.C. (2004): Ion beam and infrared analysis of medieval stained glass. *Applied Physics. A, Materials science & processing* 79 (2): 373-378.
- [34] Pérez-Villar, S., Rubio, F., Rubio, J. y Oteo, J.L. (2008): Efecto de diferentes aditivos en la coloración amarillo de plata de vidrios medievales. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. (En prensa).
- [35] Pérez-Villar, S., Rubio, J. y Oteo, J.L. (2007): Study of color and structural changes in silver painted Medieval glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids* (En prensa).
- [36] Zucchiatti, A, Pascual, C., Ynsa, M.D., Castelli, L., Recio, P., Criado, E., Valle, F.J. y Climent-Font, A. (2008): Compositional analysis of XVIII century glazed, polychrome, layered porcelain by non-destructive micro α -PIXE. *Journal of the European Ceramic Society* 28 (4): 757-762.

METODOLOGÍA EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO MEDIEVAL

A. Almagro, J. Navarro y A. Orihuela

Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad (LAAC)
Escuela de Estudios Árabes
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Frailes de la Victoria 7
18010 Granada

Resumen. La conservación del Patrimonio no supone simplemente la permanencia material de los bienes que lo integran, sino que debe suponer ante todo la preservación de un conjunto de valores que son los que en último caso justifican su trascendencia. De estos valores, unos tienen soporte directo en la propia realidad física del bien, mientras otros como los históricos, simbólicos o afectivos son en mayor o menor medida inmateriales, pero no por ello resultan menos importantes a la hora de su consideración como bienes de la colectividad. Para atender a todas estas necesidades, en el LAAC hemos desarrollado una metodología y una serie de técnicas, con sus propios procesos de investigación, que permiten dar respuestas adecuadas a la altura de la tecnología y el conocimiento de cada momento. Esta metodología incluye técnicas de documentación, de estudio arqueológico y de difusión del conocimiento, así como un rigor en la determinación de los criterios de intervención.

1. HISTORIAL DEL GRUPO

La Escuela de Estudios Árabes de Granada fue fundada por Ley de 27 de enero de 1932, aunque su inauguración oficial tuvo lugar el 21 de noviembre de 1932. En un primer momento fue orientada hacia la enseñanza de la lengua y la cultura árabes, planteándose tres objetivos principales: 1) ampliar los estudios árabes dotándolos de medios técnicos, en estrecha colaboración con el departamento correspondiente de la Universidad de Granada, 2) ejercer alguna influencia en la vida social de la ciudad de Granada, cuyo pasado está tan ligado a su herencia árabe e islámica, y 3) servir de principal nexo de unión cultural entre España y la juventud árabe y musulmana.

Como sede se eligieron las viejas Casas del Chapiz, declaradas Monumento Arquitectónico-Artístico por Real Orden el 8 de noviembre de 1919, que fueron compradas con el dinero recaudado por la venta de entradas a la Alhambra. Uno de los dos representantes del Estado en esta adquisición fue Leopoldo Torres Balbás quien, entre 1929 y 1930, inició los trabajos de restauración, para que una vez concluidos en 1932, se instalara allí la recién creada Escuela de Estudios Árabes.

Su primer director, Emilio García Gómez, quiso proporcionar cierta garantía de continuidad al centro ante las imprevisibles circunstancias de la cambiante política nacional de entonces, de modo que, sin comprometer en ningún momento la independencia de la Escuela, determinó que ésta se mantendría "a la sombra de la Universidad". Así pues, la Escuela sería "aneja, aunque independiente, de la Facultad de Letras de la Universidad granadina", y estaría "regida por un Patronato constituido por el rector de la Universidad, el decano de la Facultad de Letras, el arquitecto-conservador de la Alhambra y dos catedráticos de la Facultad de Letras, uno de ellos libremente designado por la misma y el otro el de lengua árabe, que será el director técnico de la Escuela".

Así es como entran en contacto con la Escuela las primeras personalidades vinculadas con el Arte, la Arquitectura o la Arqueología de al-Andalus, puesto que a dicho Patronato pertenecieron Antonio Gallego y Burín, que entonces era decano de la Facultad de Letras, y sobre todo Leopoldo Torres Balbás, a la sazón arquitecto-director y conservador de la Alhambra. Ambos, a su vez, se ocuparon desde entonces del *Curso Elemental de Arqueología Musulmana*, que formó parte del primer Plan de Enseñanzas de la Escuela. Asimismo, en la sección de Arte y Arqueología se comenzó a impartir un curso sobre *Técnica artística de las industrias árabe-granadinas*, a cargo de Miguel Álvarez Salamanca, profesor de la Escuela de Artes y Oficios, dirigido sobre todo a obreros, con lo que podríamos hablar de una primera iniciativa de formación de técnicos en restauración especializados en arte y arquitectura andalusíes. En el curso 1934-1935, al menos, se impartieron dos cursos monográficos: el de *Arqueología árabe*, lo dio Antonio Gallego y Burín, y el de *Arte hispanomusulmán*, Henri Terrasse. Así pues, el Arte y la Arqueología andalusíes comenzaron desde un primer momento a formar parte de los planes de estudio de la Escuela de Estudios Árabes de Granada como uno de sus pilares fundamentales, ocupando un lugar importante entre las preocupaciones académicas y científicas de sus miembros.

En cuanto al Plan de Trabajos Científicos con que contaba la Escuela en estos primeros años, hemos de mencionar, en lo relativo a Arte y Arqueología, diversas iniciativas. La primera es la del arquitecto Francisco Prieto-Moreno que comenzó a realizar los trabajos preparatorios para el levantamiento de un nuevo plano de la Granada musulmana, de acuerdo con las nuevas investigaciones del momento. Por su parte, Manuel Gómez-Moreno preparaba entonces una obra sobre la *Cerámica de la Alhambra*. Leopoldo Torres Balbás dirigía y organizaba la *Crónica arqueológica de la España musulmana*, que aparecía semestralmente en la revista *Al-Andalus*. Antonio Gallego y Burín preparaba sus estudios sobre *El arte en Granada*, y en concreto su volumen I: *La Alhambra*. El entonces becario. Manuel Ocaña Jiménez realizaba *Estudios Arqueológicos sobre la Córdoba musulmana (topografía, epigrafía, etc.)*.

Años más tarde, en 1943, Jesús Bermúdez Pareja comienza a impartir su curso monográfico sobre *Arqueología Musulmana*. A partir de 1955, también tendrá alguna colaboración en el campo del Arte y la Arqueología el Padre Darío Cabanelas (OFM), a pesar de que pertenecía a la sección de Filosofía Hispanomusulmana, comenzando en 1974 un trabajo sobre las inscripciones de la Alhambra junto con Antonio Fernández Puertas, entonces becario de la Escuela y más tarde Director del Museo de la Alhambra y Catedrático de Historia del Arte de la Universidad de Granada.

Toda esta excelente tradición de la Escuela habría servido de poco si el Consejo Superior de Investigaciones Científicas no hubiera decidido dotarse de personal propio, creando toda una serie de plazas vinculadas a la Arquitectura y a la Arqueología islámicas. Esta decisión permitió la incorporación de una serie de investigadores que han consolidado novedosas líneas de investigación; el primero fue Antonio Almagro (23 de febrero de 1987), seguido al año siguiente por Antonio Orihuela. Siendo director de la Escuela Antonio Almagro se creó la plaza de Arqueología Islámica, que sería ocupada por Julio Navarro en el verano de 2001. En febrero de 2006 se incorpora al equipo Pedro Jiménez Castillo. En 1989 Antonio Almagro, acogido al Plan Andaluz de Investigación crea un grupo denominado "Arquitectura Hispano-musulmana" formado por varios miembros de la Escuela y por profesores de las universidades de Granada y Sevilla. En 2003 es Julio Navarro el que creará otro grupo denominado "Islam Medieval: historia, arqueología y conservación del patrimonio" al que se incorporan otros miembros de las universidades andaluzas ya mencionadas. La habitual práctica de trabajo en común de ambos grupos se quiso oficializar en 2007 unificándonos en uno sólo, bajo la denominación de "Laboratorio de Arqueología y Arquitectura de la Ciudad". Con tal fusión pretendemos dar los primeros pasos para convertirnos en una unidad mixta.

2. PRINCIPIOS METODOLÓGICOS

La conservación del Patrimonio no supone simplemente la permanencia de la materia de los bienes que lo integran, sino que debe conllevar ante todo la preservación de un conjunto de valores que son los que, en último caso, justifican su trascendencia, pues mientras que unos tienen soporte directo en su propia realidad física otros, como los históricos, simbólicos o afectivos, son en mayor o menor medida inmateriales, pero no por ello resultan menos importantes a la hora de su consideración como bienes de la colectividad.

Toda protección patrimonial debe, por tanto, basarse en identificar estos valores, como paso previo a cualquier otra actuación. De ahí la importancia de que exista una estrategia investigadora sobre el patrimonio con independencia de las intervenciones concretas que en un momento dado deban realizarse. Este esfuerzo por conocer debe estar siempre abierto y enriqueciéndose constantemente, pues con ello incrementamos la propia importancia del bien.

Esta concepción de la conservación nos lleva inevitablemente a la necesidad de la investigación sobre el patrimonio desde una perspectiva interdisciplinar, que no supone sólo la intervención de distintos profesionales con puntos de vista diferentes y con aplicaciones metodológicas diversas, sino sobre todo de una concepción global unitaria y convergente hacia ese objetivo común de identificar los valores inherentes y buscar los medios para su preservación. Podemos afirmar que la base y la garantía de una buena protección del patrimonio es el conocimiento adecuado del mismo.

Con esta perspectiva venimos trabajando, tanto en la obtención de información extraída del propio patrimonio como en la actuación sobre él, aplicando por un lado el saber acumulado y tratando a la vez de obtener nuevos datos mediante intervenciones físicas de excavación arqueológica o de restauración. Para alcanzar estos objetivos se cuenta con profesionales de distintas formaciones y experiencias, pero también se ha recurrido permanentemente a la participación de otros colegas del propio CSIC o de otras instituciones que los complementen, procurando de este modo abordar todos los aspectos de interés que puedan encontrarse.

De acuerdo con la metodología desarrollada, el proceso de actuación comporta una fase previa de documentación, tanto gráfica como documental y de análisis del edificio incluyendo el estudio estratigráfico de paramentos y fábricas y en algunos casos sondeos arqueológicos previos. También se analizan los aspectos constructivos y de materiales junto con las patologías que les afectan y sus causas. Toda esta investigación comporta la generación de un conocimiento del que dimanarán las actuaciones a seguir. Éstas pueden ser de dos tipos, que en ningún caso son excluyentes sino complementarias. Si el edificio o monumento necesita una intervención de restauración, se procede a la redacción del correspondiente proyecto basado en la información disponible. En todo caso, tanto si se actúa físicamente sobre el objeto como si no, se plantea siempre una labor de difusión del conocimiento a incrementar continuamente en dos frentes diferentes: el primero de carácter científico, a través de publicaciones especializadas, comunicaciones y ponencias en reuniones académicas; el segundo, con una dimensión más divulgadora y popular, mediante la utilización de paneles explicativos en el propio monumento, conferencias y medios audiovisuales. Tanto la fase de intervención, como la misma de difusión producen siempre nuevos conocimientos y reflexiones que retroalimentan el proceso en su carácter abierto, como ya indicamos anteriormente.

Para atender a todas estas necesidades, en el LAAC hemos desarrollado una serie de técnicas, con su propio método de investigación, que permiten dar respuestas adecuadas a la altura de la tecnología de cada momento. Todo ello, bajo la firme convicción de que el

conocimiento sobre el patrimonio y su difusión a la sociedad resulta siempre el camino más directo y seguro para garantizar su conservación.

3. TÉCNICAS APLICADAS

3.1. Documentación. Fotogrametría

Desde los mismos orígenes recientes del grupo, se procuró dotarlo de los medios técnicos, tanto instrumentales como humanos, que permitieran fundamentar los trabajos de investigación en una base sólida de documentación de los distintos monumentos y estructuras a estudiar. Las técnicas de documentación y levantamiento por fotogrametría han sido objeto de un proceso propio de investigación, con el fin de dar respuestas adecuadas a este problema de acuerdo con el progreso tecnológico. Así, la Escuela de Estudios Árabes es, desde hace bastantes años, un centro de referencia, incluso a nivel internacional, en las técnicas de levantamiento por fotogrametría, proporcionando en este campo servicios a otras entidades o grupos de investigación [1, 2]. Merced a la experiencia de Antonio Almagro se ha conseguido disponer de una instrumentación muy completa, tanto de topografía como de fotogrametría para aplicaciones arquitectónicas, que en la actualidad consiste en dos taquímetros digitales y dos restituidores analíticos, uno de gran formato (fotogramas hasta 23 x 23 cm) Leica SD2000 y otro de formato medio (fotogramas hasta 6 x 6 cm) Adam MPS2. Se dispone igualmente de cámaras semimétricas de formato medio y de una cámara métrica de formato 9 x 12 cm. También se han ido incorporando sistemas digitales, tanto de rectificación fotográfica como de estereo-restitución, contando con software que se ha mejorado gracias en parte a la colaboración que el grupo ha prestado a otros especialistas y centros extranjeros de investigación en fotogrametría [3]. A pesar de contar con instrumentos y técnicas sofisticadas y de la máxima precisión, se ha apostado también en este campo por el uso y difusión de técnicas simplificadas, hoy especialmente disponibles gracias a la fotogrametría digital [4]. Junto a la dotación instrumental, el grupo ha ido formando e incorporando personal especializado en el uso de estas técnicas y ha formado a otros técnicos de centros universitarios y de investigación así como del ámbito privado.

3.2. Arqueología

Igualmente hemos desarrollado las técnicas arqueológicas necesarias para un correcto análisis del monumento en su contexto urbano, pues el elemento patrimonial no se puede entender aisladamente dado que tanto el uno como el otro comparten una historia dinámica, en la que han existido interacciones que es necesario investigar; por este motivo hemos incrementado los estudios que permiten conocer los mecanismos de evolución de los tejidos urbanos y su incidencia en la transformación del parcelario y del crecimiento de los edificios en altura.

Así mismo, venimos aplicando en el estudio de los monumentos las técnicas de análisis estratigráfico murario y paramental, propias de la Arqueología de la Arquitectura y que se basan en la consideración del edificio histórico como un documento estratigráfico que alberga información de naturaleza arqueológica y que, por tanto, es susceptible de ser estudiado mediante una metodología de esta naturaleza.

3.3. Criterios de intervención

La intervención sobre bienes patrimoniales debe basarse en criterios rigurosos que sean consecuentes con la metodología de actuación. Toda intervención, ya sea por razones de incrementar nuestro conocimiento sobre dichos bienes, por la inexcusable necesidad de preservarlos para el futuro, o por la conveniencia de su uso y disfrute por parte de los ciudadanos, debe realizarse desde el rigor que hoy cabe exigir a todo desarrollo científico. Es imprescindible que exista un adecuado conocimiento sobre la naturaleza del bien, sus valores y el estado de conservación de su materia, así como sobre su entorno y la

interrelación que existe entre ambos. Conseguido este conocimiento, la intervención deberá ser consecuente con ello y con los principios generales de que la actuación sea la mínima indispensable, y de atender a la recuperación de los valores fundamentales, que deberán primar sobre razones utilitarias o de otra índole. Las intervenciones tendrán que ser reconocibles, al menos merced a una completa documentación que informe sobre lo realizado, el estado inicial y los criterios empleados. En todo caso se intentará huir de todo protagonismo, procurando que los añadidos necesarios se integren de forma adecuada y nunca resten protagonismo a la obra original. Deberá buscarse la compatibilidad de los materiales utilizados y siempre que sea posible, acudir a técnicas y materiales tradicionales similares a los que integran la obra primitiva.

3.4. Difusión: infografía y sistemas audiovisuales

La apuesta que desde los mismos orígenes de los sistemas de CAD se hizo desde el grupo por estos métodos de representación informatizados, ha llevado consigo la permanente actualización de los medios gráficos utilizados con la también muy temprana incorporación de los sistemas de modelación virtual, considerándolos un poderoso instrumento tanto de difusión de nuestros conocimientos e hipótesis como de reflexión sobre las mismas. Ya en el año 2000 se realizó una reconstrucción completa de la ciudadela omeya de Amman que se incorporó dentro de un CD a la publicación científica de las investigaciones allí realizadas [5]. En la actualidad, la modelación y reconstrucción virtual de edificios y núcleos urbanos andalusíes constituye una de las actividades más sobresalientes desarrolladas por el Laboratorio, disponiendo de personas con una notable experiencia tanto en el uso del software como en las características formales de la arquitectura andalusí, lo que ha permitido alcanzar una alta calidad en nuestras producciones, así como el desarrollo de varias tesis doctorales sobre este tema.

Como muestra de todo lo expresado se presentan algunos proyectos en los que se puede apreciar el alcance de la aplicación de esta metodología. Todos fueron desarrollados en estos últimos años desde la Escuela de Estudios Árabes y encargados por diferentes administraciones públicas y entes privados.

4. EL CUARTO REAL DE SANTO DOMINGO DE GRANADA

El Cuarto Real de Santo Domingo es uno de los edificios más importantes del período nazarí, que tiene además el aliciente de ser anterior a la mayor parte de las construcciones de la Alhambra. Se conservó dentro del convento de los dominicos de Granada y pasó a manos privadas en el siglo XIX, siendo adquirido por el Ayuntamiento de la ciudad en 1990. Tras su compra, se encomendó a la Escuela de Estudios Árabes los estudios necesarios para su restauración y apertura al público. En el año 1995, a propuesta de la Escuela, se realizaron una serie de investigaciones con el objeto de conocer con detalle el estado real del monumento nazarí y su forma primitiva. Se hizo un levantamiento fotogramétrico a escala adecuada que recogía toda la decoración de yeserías, alicatados y pinturas, se acometieron excavaciones arqueológicas dentro de la sala cuadrada o *qubba*, que constituye la pieza fundamental del edificio, así como en su entorno y en el jardín que se extendía en su frente, se analizaron los paramentos con el fin de identificar las fases constructivas y las intervenciones modernas, se hicieron pruebas de limpieza y consolidación de las pinturas y yeserías, se tomaron muestras de la madera de la armadura que cubre la *qubba* para datarla mediante dendrocronología, etc. [6]. En estos estudios participaron, junto al personal científico y técnico del CSIC, otros investigadores de la Universidad de Granada y del INIA. Estos trabajos proporcionaron importantes datos que obligaron, en primer lugar, a rectificar muchas de las hipótesis que se habían venido barajando en torno al monumento y su estructura original, además de facilitar la información necesaria para la redacción de un proyecto de intervención con plenas garantías en su ejecución posterior. Se descubrió la alberca octogonal que había delante del pórtico que

precedía a la *qubba*, se pudo establecer la relación original entre el espacio central de la *qubba* y otros ámbitos satélites que la rodeaban, se descubrieron nuevas pinturas ornamentales, se identificó la disposición primigenia del jardín, etc. Fruto de este estudio fue un informe en que se establecía una propuesta de restauración que preveía la desaparición de las edificaciones modernas añadidas en el XIX y la recuperación del jardín medieval [7].

En el año 2000, tras muchas vacilaciones municipales y no pocas controversias con los responsables del patrimonio se pudo acometer la restauración de la *qubba* mediante un proyecto de obras, que gracias a disponer de la información adecuada pudo ser ejecutado sin apenas desviaciones respecto a lo previsto, tanto en las operaciones a realizar como en lo relativo al coste económico. Se pudo despejar la *qubba* de añadidos y modificaciones modernas, salvo alguna que obligó a dejar la Comisión Provincial de Patrimonio en contra del criterio de los investigadores del grupo, recuperando no sólo la forma espacial primitiva, sino también la disposición estructural cuya modificación había sido la causante de muchos de los daños que sufría el edificio. También se rehizo la estructura externa de la cubierta reforzando con ello los muros y suprimiendo los tirantes metálicos colocados de manera antiestética a comienzos del siglo XX, se limpió y consolidó la armadura del techo, se eliminaron los encalados de las yeserías y se consolidaron los restos de pintura tanto de la ornamentación de yeso como de los zócalos. Igualmente se restauraron los paños de alicatado, quitando los refuerzos metálicos modernos de las esquinas. Todo esto se realizó con los adecuados controles analíticos que han seguido aportando información sobre el edificio y sus alteraciones. Finalmente se repusieron pavimentos y carpinterías y se dotó a los espacios de iluminación adecuada y sistemas de seguridad.

Aunque hoy la *qubba* está ya abierta al público, sigue pendiente dar una solución definitiva a su entorno, pues las controversias surgidas al respecto, en realidad sin el menor fundamento, han impedido acabar de demoler el edificio decimonónico adosado y recuperar la estructura del jardín medieval. Estos aspectos resultan fundamentales para permitir la adecuada comprensión del monumento, de su forma primitiva y de su función como espacio íntimamente ligado al disfrute del jardín, y de los placeres sensitivos que proporcionaba, junto con los que ofrecía la propia sala y su privilegiada posición sobre un entorno de huertas y naturaleza hoy definitivamente transformados por el desarrollo urbano. No obstante, la posibilidad de recuperar el jardín inmediato en su forma original pueden hacer de este conjunto un caso único en nuestro patrimonio arquitectónico.

5. EL ALCÁZAR REAL DE GUADALAJARA

El estudio y puesta en valor del Alcázar Real de Guadalajara ha sido un trabajo encargado por el Ayuntamiento de esa ciudad a nuestro grupo, con el fin de sacar al monumento de la situación de abandono en que se encontraba. Fue el 9 de febrero de 2004 cuando se firmó el convenio de colaboración por el que, a partir de esa fecha, la Escuela de Estudios Árabes coordinaría todos los trabajos que allí se fueran a realizar.

Pese a su estado de abandono y escasa visibilidad pública, es innegable que se trata de un monumento que contiene valores históricos y formales que por su interés merecían una recuperación que permitiera su disfrute social. Los restos conservados aunque no poseen valores monumentales excepcionales sí tienen, en el conjunto de una ciudad como Guadalajara, un lugar de referencia histórica obligada y contienen una potencialidad de uso y aprovechamiento cultural que merece ser tenida en cuenta.

Hay noticias suficientes para conocer los rasgos más generales de su historia desde su fundación. Tras un esplendoroso periodo como palacio real, durante los siglos XIV y XV, conoció una larga etapa de abandono que finalizó en 1778 cuando en su interior se construyó, de nueva planta, la ampliación de la Real Fábrica de Paños de Guadalajara

(1778-1822); más adelante se alojarán allí los cuarteles de San Carlos y Santa Isabel (1840-1860), para a partir de 1860 permanecer sólo el de San Carlos (1860-1936); en 1898 también se instalará allí la sección de niños del Colegio de Huérfanos del Ejército de Tierra hasta su destrucción y definitiva ruina en 1936.

Las excavaciones arqueológicas nos permiten afirmar que todas las estructuras hasta ahora identificadas son cristianas, pertenecientes a tres fases constructivas diferentes:

La primera es un edificio de planta trapezoidal casi cuadrado con torreones circulares en sus esquinas. A pesar de ser una obra unitaria no tenemos datos precisos que permitan asegurar con exactitud su cronología, aunque pensamos que se trata de una obra de finales del siglo XIII o principios del XIV, pues es a partir del reinado de Sancho IV (1284-1295) cuando percibimos que Guadalajara empieza a ser utilizada más asiduamente como residencia real, especialmente por sus hijos, la infanta Isabel y su hermano, el futuro rey Fernando IV. Disponemos ya de suficientes datos para afirmar que el área residencial que hubo en su interior se compuso de cuatro grandes salones en torno a un patio porticado con jardín de crucero y alberca central. El salón oriental se abría a una terraza anexa proyectada hacia el barranco del Alamín, construida al igual que el primero sobre unos espacios cubiertos por bóvedas baídas.

La segunda fase corresponde al palacio del siglo XIV y es sustancialmente el mismo que el anterior, limitándose lo nuevamente construido a una ampliación hacia el norte del edificio preexistente. Como hipótesis proponemos que fue Alfonso XI su promotor. Se trata de una obra de tapial de 2,70 m de espesor y 10 m de altura conservada. Sabemos que estaba compuesta por tres crujías, lo que en principio es bastante anómalo. La primera, la más inmediata al patio, debió de ser la galería que, a modo de pórtico, precedió a un gran salón que ocupa la segunda. Por éste se accedía a una sala cuadrada cubierta con un techo decorado o *qubba* situada en la tercera crujía.

A una tercera fase, atribuible con bastante seguridad a Enrique IV, parece corresponder un segundo recinto fortificado que, a modo de antemuro, protegía los frentes meridional y occidental de la residencia real. El elemento más significativo es una puerta monumental con torreones macizos en sus ángulos.

Aunque con anterioridad a nuestra llegada se realizaron allí diversas obras de restauración parciales, no demasiado afortunadas en su conjunto, pero que permitieron, al menos, cubrir parte de las estructuras arquitectónicas con valores espaciales aún conservados, era necesario continuarlas, pero ahora con una metodología y un alcance adecuados a los fines que establecíamos de forma clara y ambiciosa, buscando la recuperación de todos los valores que el lugar encerraba, garantizando su protección futura.

Estábamos convencidos de que inicialmente no era aconsejable plantear un uso concreto que prejuzgara situaciones o formas futuras de utilización del espacio o de ubicación de estructuras arquitectónicas permanentes o incluso de meros aprovechamientos culturales. Creímos que lo que sí se debía resaltar era su clara vocación como recurso cultural basado fundamentalmente en la valoración y presentación de su historia y de su realidad presente.

Sobre esta premisa propusimos un plan de actuación en el que sólo en sus últimas etapas y cuando se hubieran logrado alcanzar los objetivos ya dichos, se podría plantear para el monumento otras funciones de carácter cultural o de interés social, pero sin que tales posibilidades se presentaran como un objetivo necesario, pues estuvimos convencidos desde el primer momento de que los valores históricos y el disfrute de los restos arqueológicos podían ser funciones que por sí solas justificaran las intervenciones que en ese momento proponíamos. Cualquier decisión que en un futuro se tome respecto al Alcázar, como por otro lado siempre debe ocurrir con cualquier otro monumento, debe estar

basada en un profundo y exhaustivo conocimiento del mismo, tanto de su realidad material, como de su historia así como de las connotaciones y valores simbólicos que pueda representar para los ciudadanos. Por tanto, vimos necesario abordar un plan de investigación ambicioso que abarcara los distintos aspectos antes planteados, basado en tres elementos fundamentales: un equipo que lo llevara adelante con la metodología adecuada, una financiación acorde y suficiente y una planificación que permitiera abordar el trabajo con el tiempo suficiente, sin dilaciones, pero sin premuras.

Para poder disponer de estos medios hacía falta un respaldo social adecuado y para ello creímos necesario que los ciudadanos, en especial los de Guadalajara, asumieran el proyecto como suyo. Por ello consideramos imprescindible que estuvieran en todo momento informados tanto del proyecto como de su realización. Esta información debía fluir de manera continua y por ello se pretendía que el Alcázar no continuara siendo un recinto cerrado e ignorado, sino un monumento venerable, en proceso continuo de recuperación, abierto a la visita de cualquier ciudadano. Para alcanzar estos fines realizamos toda una serie de actuaciones que pasamos a enumerar:

- El plan global de actuaciones preveía una campaña arqueológica de limpieza del monumento incluidas las pequeñas zonas ya excavadas que se realizó entre noviembre de 2004 y enero de 2005. Supuso básicamente el desbroce y desescombro cuidadoso del Alcázar, dejándolo preparado para los trabajos de planimetría y dibujo de alzados mediante fotogrametría. Con esta simple intervención descubrimos la existencia del palacio del siglo XIV.

- Investigaciones de archivo. Desde el primer momento se vio la necesidad de hacer una intensa búsqueda de documentación de archivo que nos pudiera informar sobre la compleja historia del monumento. Con este fin visitamos los siguientes archivos: Municipal de Guadalajara, Histórico Provincial de Guadalajara (AHPGU), General de Simancas (AGS), Histórico Nacional Sección Osuna (AHN) y Real Chancillería de Valladolid; en breve tenemos previsto acudir a los archivos de la Catedral de Toledo, Diocesano de Toledo y General de la Administración (Alcalá de Henares).

- Levantamiento del monumento. Realización de una planimetría adecuada, tanto de plantas como de alzados, utilizando técnicas fotogramétricas. Esta información se considera en todo caso fundamental, como ya se ha expresado, pero en el presente de un modo especial ya que los muros que han sobrevivido al paso del tiempo contienen en sus alzados las huellas de las distintas fases históricas del edificio y es fundamental registrar esa información de manera apropiada.

- Excavaciones arqueológicas. Con anterioridad a nuestra llegada al monumento en 2004 se realizaron intervenciones arqueológicas durante los años 1998 y 2000, a cargo de un equipo contratado por el Ayuntamiento de Guadalajara. Nuestra primera campaña se realizó en 2005 y se caracterizó por intervenir en superficies reducidas seleccionadas con el objetivo de obtener la máxima información para conocer la distribución interna del palacio bajo medieval [8]. La segunda campaña se desarrolló entre julio de 2006 y marzo de 2007 y se centró especialmente en la excavación de la crujía oriental, como apoyo a las obras de consolidación del espacio abovedado subyacente [9, 10]. Paralelo a nuestros trabajos se ha acogido, bajo nuestra dirección científica, la presencia de una escuela taller de empleo de arqueología, compuesta por un grupo de 6 alumnos y un monitor; su actuación, desde octubre de 2006 hasta noviembre de 2007, se limitó al frente occidental del recinto interior.

- Obras de conservación y restauración. Durante este tiempo se han desarrollado dos proyectos de obras, dirigidos por arquitectos con residencia cercana al lugar y supervisados por el grupo de investigación. En una primera fase se abordó la consolidación urgente de todas las zonas peligrosas del monumento, realizando apeos y recalces de urgencia.

Simultáneamente se construyeron las estructuras auxiliares imprescindibles para permitir la visita pública del monumento sin interferir en las tareas de restauración ni en las excavaciones arqueológicas

- Musealización. Se han realizado unas estructuras de carácter desmontable que garantizan una adecuada visita al monumento sin que ello colisione con el hecho de que el Alcázar es y será durante años un yacimiento arqueológico en excavación y un monumento en obras. La estructura principal es un pabellón de recepción en el que se presenta una explicación del monumento y su historia mediante una serie de paneles; a continuación una pasarela metálica recorre en altura los lados norte y este del recinto intramuros lo que permite contemplarlo en su totalidad. Se han colocado verjas y vallas que garanticen la perfecta protección contra intrusismos y actos vandálicos o inadecuados en el interior y los accesos han sido dotados de puertas de reja. El ayuntamiento organiza visitas guiadas todos los fines de semana.

6. INTERVENCIONES EN EL ALCÁZAR DE SEVILLA

A comienzos del año 1997, la Dirección del Alcázar de Sevilla propuso a la Escuela de Estudios Árabes la realización de una planimetría completa del Real Alcázar que permitiera cubrir la carencia de documentación fiable y actualizada que presentaba el monumento y pudiera servir de base tanto para las labores de conservación como para las investigaciones que se realizaran en el futuro. A través de oportunos convenios desarrollados a lo largo de tres años se realizó un exhaustivo trabajo de levantamiento cuyos frutos quedaron plasmados en una publicación en forma de carpeta con 40 láminas conteniendo la parte fundamental del trabajo realizado que vio la luz en el año 2000 [11].

Las posibilidades que esta información proporcionaba, fueron de inmediato aprovechadas por los propios miembros del grupo, que a través de su análisis han realizado una serie de investigaciones de tipo arquitectónico y arqueológico conducentes a establecer la forma que presentaban distintas partes del Alcázar a lo largo de su historia, haciendo énfasis, lógicamente, en los periodos medievales relacionados con el arte de tradición andalusí. Estos trabajos, que han dado lugar a las oportunas publicaciones en revistas científicas de impacto [12, 13], han servido a su vez de base para una labor divulgadora basada en el uso de las tecnologías relacionadas con la informática y la infografía, mediante las cuales se hicieron una serie de reconstrucciones virtuales de distintas zonas del Alcázar en varias épocas. Aprovechando las primeras experiencias realizadas sobre otros proyectos anteriores, se ofreció al Patronato del Alcázar la posibilidad de realizar un audiovisual interactivo sobre el Patio del Crucero que inicialmente se instaló en una torre dotada de un ordenador y una pantalla elevada en la que se pueden visualizar tanto recorridos interactivos como otros por animación continua. Posteriormente este audiovisual se ha editado en forma de CD en dos idiomas [14].

La presentación dentro del Alcázar de una exposición sobre la figura de Ibn Jaldún, historiador y filósofo del siglo XIV que visitó el Alcázar como embajador del Sultán nazarí de Granada, organizada por la Fundación El Legado Andalusí, nos brindó la posibilidad de realizar otro audiovisual, aún más ambicioso, pues comprendía la casi totalidad del Alcázar, mostrando la hipótesis de cómo pudo ser este conjunto en uno de los momentos de su máximo esplendor, cuando era la residencia principal del rey castellano Pedro I [15]. En este audiovisual, posteriormente editado en forma de DVD [16], se han plasmado las investigaciones realizadas en estos años, algunas aún pendientes de publicación científica definitiva, pero sus imágenes y el proceso desarrollado para su realización, han sido además motivo de reflexión, y en muchos casos de revisión de nuestras propias hipótesis, convirtiéndose de este modo un medio de divulgación de la investigación en parte del propio proceso científico.

El conocimiento creciente que del monumento ha ido adquiriendo el grupo con todos estos trabajos ha motivado que la Dirección del Alcázar nos haya encomendado nuevas tareas. En 2003, a raíz del descubrimiento de las estructuras enterradas del primitivo jardín del Patio de las Doncellas, se nos solicitó coordinar el plan para su recuperación y redactar el oportuno proyecto de restauración. Las labores de excavación arqueológica fueron realizadas por Miguel Ángel Tabales, de la Universidad de Sevilla, responsable del proyecto de investigación arqueológica desarrollado en el Alcázar entre los años 1997 y 2004 y descubridor de los primeros vestigios del jardín. La obra realizada ha permitido reintegrar a la fisonomía del palacio un elemento fundamental del mismo que quedó muy tempranamente oculto, pero que lo caracteriza como ejemplo de la arquitectura palatina de tradición andalusí [17].

Terminada esta obra, en el año 2005 la Dirección del Alcázar nos volvió a encomendar la restauración de la fachada del palacio de Pedro I, una de las obras cumbres del arte mudéjar. Con este fin, constituimos un grupo interdisciplinar de investigación integrado por varios miembros de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC así como de la Universidad de Granada, con el fin de desarrollar un plan completo de estudio de las distintas problemáticas que presenta la fachada como paso imprescindible y previo a la redacción del proyecto de restauración. A lo largo del año 2005 y parte del 2006 se han realizado análisis de los distintos materiales que la integran, investigando su origen, su estado de conservación y las causas de su deterioro, así como de los agentes físico-químicos y biológicos que inciden en el mismo. Igualmente se ha realizado un exhaustivo estudio histórico-arqueológico destinado a distinguir las distintas fase de construcción y las numerosas restauraciones realizadas, muchas de las cuales han podido ser identificadas no sólo por el rastreo de la documentación escrita, sino por una búsqueda y recogida de información gráfica, sobre todo de fotografías del siglo XIX que ha proporcionado datos de sumo interés. Gracias a todo esto se dispone de información valiosísima que enriquece nuestro conocimiento sobre el Alcázar y facilita la toma de decisiones.

A partir del informe realizado, a finales de 2006 se redactó el oportuno proyecto de intervención, cuya primera fase se encuentra en ejecución y en el transcurso de la cual se están continuando las labores de investigación, habiéndose ampliado a análisis de dendrocronología y nuevos estudios de estratigrafía muraria, así como a una mejor caracterización de los materiales pictóricos del alero.

7. RECUPERACIÓN DE LAS CASAS MORISCAS DE GRANADA

En el barrio del Albayzín de Granada existe un abundante grupo de casi un centenar de casas que fueron construidas o reformadas por los mudéjares (1492-1500) y/o moriscos (1501-1568), y que constituyen un patrimonio de excepcional interés arquitectónico e histórico a causa, entre otras razones, de las diversas influencias que su contexto multicultural ha dejado en ellas plasmado [18]. Su estado de conservación es muy diverso, habiéndose mantenido unas relativamente completas y con escasas intervenciones, mientras que otras sólo mantienen elementos parciales u ocultos por modificaciones posteriores. Su general preservación sin grandes modificaciones se debe a la precariedad económica sufrida por el vecindario de este barrio desde la expulsión de los moriscos (1571) hasta la década de 1980.

La Escuela de Estudios Árabes viene estudiando este interesante conjunto arquitectónico y realizando desde hace tiempo levantamientos planimétricos así como asesoramiento en su restauración. Actualmente estos trabajos se encuadran dentro de un proyecto del Plan Nacional I+D+i (HUM2006-12446) cuyos objetivos, además del conocimiento siguiendo la

sistemática aplicada habitualmente por el grupo de investigación, incluyen diseñar unos criterios de intervención y una metodología orientada a su conservación, que sirvan de guía a las instituciones y los profesionales implicados en su rehabilitación.

Aunque las casas han sido objeto de algunos estudios parciales, hasta la puesta en práctica de este proyecto de investigación carecían de un trabajo interdisciplinar que analizase en profundidad sus valores arqueológicos, arquitectónicos, constructivos, urbanísticos y culturales [19]. Su estudio integral está siendo realizado por un equipo científico multidisciplinar capaz de reunir levantamientos arquitectónicos precisos y completos, análisis con metodología arqueológica, estudio de la epigrafía, documentación escrita, recopilación de iconografía antigua, etc. Dicho equipo está formado por miembros de la Escuela de Estudios Árabes, del CNRS de Lyon, de las Universidades de Granada, Sevilla y Complutense de Madrid, de la Consejería de Educación de la Junta de Andalucía, del Instituto Gómez-Moreno, Fundación Rodríguez Acosta de Granada y de empresas especializadas en restauración.

El estudio de las casas ha partido de una planimetría precisa, realizada con técnicas de fotogrametría estereoscópica y rectificación fotográfica con apoyo taquimétrico. En ella se han incluido los siguientes análisis: del entorno urbanístico y del parcelario, de los tipos arquitectónicos, de paramentos con metodología arqueológica, de las técnicas constructivas, de la decoración y de la epigrafía árabe. El trabajo de campo se contrasta con las fuentes documentales y las imágenes gráficas existentes. Todos los datos obtenidos se integran en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Finalmente, se están diseñando unos criterios de intervención y una metodología orientada a su conservación, que sirva de guía a las instituciones y los profesionales implicados en su rehabilitación, para evitar los errores y pérdidas irreparables que se vienen produciendo, pese a su catalogación y protección legal, pues una parte importante de estas intervenciones han supuesto un detrimento considerable de sus valores arquitectónicos, históricos y documentales, ya que la mayoría de las intervenciones no se han realizado con el suficiente conocimiento y respeto de las características fundamentales, así como con unos criterios y metodología de restauración adecuados [18-21]. Al mismo tiempo, el grupo de investigación está interviniendo directa o indirectamente en la restauración de algunas de estas Casas Moriscas.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Almagro, A. (2003): De la fotogrametría a la infografía. Un proceso informatizado de documentación, en A. García Porras (ed.) *Informática y Arqueología medieval*: 47-81. Granada: Universidad de Granada.

[2] Almagro, A. (2004): *Levantamiento Arquitectónico*. Granada: Universidad de Granada.

[3] Almagro, A. (2000): VSD in Spain. Cooperation between Poland and Spain in Terrestrial Photogrammetry. En *Fotogrametria, Teledetekcja i GIS u Progu Trzeciego Tysiaclecia, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 10: 6.1-6.9. Cracovia.

[4] Almagro, A. (2002): Simple Photogrammetry. Easy and Fast. En *XVIII International Symposium of CIPA, Potsdam, September 18-21, 2001*: 32-38. Berlín.

[5] Almagro, A. (2000): *El Alcázar Omeya de Amman, The Umayyad Palace of Amman, Al-Qasr al-mawwi fi Amman*. CD-Rom. Audiovisual interactivo. Granada.

[6] Almagro, A. (2002): El análisis arqueológico como base de dos propuestas: El Cuarto Real de Santo Domingo (Granada) y el Patio del Crucero (Alcázar de Sevilla). *Arqueología de la Arquitectura* 1: 175-192.

- [7] Almagro, A y Orihuela, A. (1997): Propuesta de intervención en el Cuarto Real de Santo Domingo (Granada). *Loggia, Arquitectura y Restauración* 4: 22-29.
- [8] Navarro Palazón, J. (2005): Excavaciones arqueológicas en el Alcázar de Guadalajara. *El Legado Andaluz* 23: 66-69.
- [9] Navarro Palazón, J. (2006): El Alcázar Real de Guadalajara. Noticias de las excavaciones realizadas durante el año 2005. *Castillos de España* 141: 15-23.
- [10] Navarro Palazón, J. (2007): El Alcázar Real de Guadalajara. Un nuevo capítulo de la arquitectura bajomedieval española. En *Arqueología de Castilla-La Mancha. I Jornadas, Cuenca, 13-17 de diciembre de 2005*: 583-613. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha / Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha.
- [11] Almagro, A. (2000): *Planimetría del Alcázar de Sevilla*. Carpeta con 40 planos. Granada: Escuela de Estudios Árabes / Patronato del Real Alcázar.
- [12] Almagro, A. (1999): El Patio del Crucero de los Reales Alcázares de Sevilla. *Al-Qantara* XX (2): 331-376.
- [13] Almagro, A. (2007): Una nueva interpretación del patio de la Casa de Contratación del Alcázar de Sevilla. *Al-Qantara* XXVIII (1): 181-228.
- [14] Almagro, A. (Director) (2005): *El Patio del Crucero del Alcázar de Sevilla*. CD-Rom. Audiovisual interactivo. Granada.
- [15] Almagro, A. Rodríguez, C. González, M y Zúñiga, I. (2006): The Alcazar of Seville in the 14th Century. An integrated Project of Documentation, Research and Dissemination. En M. Ianides, D. Arnold, F. Niccolucci y K. Mania (eds.) *VAST 2006. The e-volution of Information Communication Technology in Cultural Heritage*, Nicosia: 15-22. Budapest: Archeolingua.
- [16] Almagro, A. (Director) (2006): *El Alcázar de Sevilla en el siglo XIV. The Alcazar of Seville in the 14th Century*. DVD. Granada.
- [17] Almagro, A. (2005): La recuperación del jardín medieval del Patio de las Doncellas. *Apuntes del Alcázar de Sevilla* 6: 44-67.
- [18] Almagro, A. y Orihuela, A. (2001): De la casa andalusí a la casa morisca: evolución de un tipo arquitectónico. En J. Passini (coord.) *La ciudad medieval: de la casa al tejido urbano, Actas del I Curso de Historia y Urbanismo Medieval*: 51-70. Cuenca: Universidad de Castilla-La Mancha.
- [19] Orihuela, A. (2007): The Andalusí House in Granada. (Thirteenth to Sixteenth Centuries). En G.D. Anderson y M. Rosser-Owen (eds.) *Revisiting Al-Andalus. Perspectives on Material Culture of Islamic Iberia and Beyond*: 169-191. Leiden: Brill.
- [20] Orihuela, A. (2007): The use of wood in Morisco houses in sixteenth century Granada (Spain). En M. Dunkeld *et al.* (eds.) *Proceedings of the Second International Congress on Construction History*. Vol. III: 2363-2378. Cambridge.
- [21] Orihuela, A. (2007): Restauración de casas andalusíes en Granada. En J. Passini y R. Izquierdo (coords.) *La ciudad medieval de Toledo: Historia, Arqueología y Rehabilitación de la casa*: 213-233. Toledo: Universidad de Castilla-la Mancha.

ARQUEOLOGÍA DE LA ARQUITECTURA Y PATRIMONIO EDIFICADO. EXPERIENCIAS Y PERSPECTIVAS UNA DÉCADA DESPUÉS

M.^a A. Utrero Agudo

Instituto de Historia, CCHS, CSIC. C/ Albasanz 26-28, 28037 Madrid

Resumen: El carácter de la actividad llevada a cabo por el Grupo de Investigación Arqueología de la Arquitectura. Arqueología tardo-antigua y alto-medieval española a lo largo de los últimos años se entiende dentro de los sucesivos contextos científicos y laborales en los que se ha desarrollado. La participación en distintos proyectos de investigación y de restauración y conservación del patrimonio edificado han permitido desarrollar una herramienta analítica y un modelo explicativo que cuentan ya con unas sólidas bases.

1. INTRODUCCIÓN A LA ACTIVIDAD DEL GRUPO

Desde hace algo más de una década, el investigador Luis Caballero Zoreda (Instituto de Historia, CSIC) ha venido desarrollando una doble línea de trabajo en la que convergen método analítico y modelo histórico. Los sucesivos proyectos de investigación han sido el marco para proceder a una labor de caracterización y revisión de la arquitectura eclesiástica de las épocas tardoantigua y altomedieval (siglos V-X) en la Península Ibérica. A su vez, la participación en distintos contratos de análisis paramental y posterior restauración tanto con entidades públicas (gobiernos central y autonómicos) como privadas ha servido para poner a punto la herramienta metodológica y ensayar distintos procedimientos prácticos con el objetivo final de obtener una rigurosa comprensión de arquitecturas de distintas épocas y tipos, validando de este modo su necesaria aplicación en el conocimiento, preservación e intervención del patrimonio edificado.

2. EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO

2.1. El equipo

Arce y Utrero [1] indicaron que la investigación científica desarrollada por el equipo se inscribe dentro de un debate historiográfico en el que se discuten los principios conceptuales, argumentales y metodológicos que han servido de base hasta hoy para definir la arquitectura peninsular de las épocas tardoantigua y altomedieval y construir un modelo explicativo vigente acorde. El nuevo modelo explicativo [2] es, ante todo, una nueva propuesta histórica basada en una fuerte renovación metodológica.

Una rápida revisión de los contextos científicos local [3] y foráneo [4-5] pone de manifiesto que las primeras experiencias estratigráficas en la arquitectura se llevaron a cabo en conjuntos arquitectónicos medievales. El análisis del suelo y de los alzados de las iglesias de S. Quirze de Pedret [6], S. Pedro de Arlanza [7], Sta. Eulalia de Mérida [8] o S. Román de Tobillas [9], entre otros, dan fe de su aplicación en la arquitectura eclesiástica tardoantigua y altomedieval de la Península.

En este sentido, es necesario subrayar cómo el grupo de investigación fue pionero en la aplicación de la metodología arqueológica al estudio de los alzados construidos de las épocas señaladas en la Península Ibérica [10]. La puesta en marcha de proyectos se realizó de acuerdo a un planteamiento coherente de sus contenidos y de la consecución de resultados con el objetivo de avanzar en el afianzamiento del modelo histórico planteado mediante la aplicación del método arqueológico. Como continuación de unos proyectos de

investigación iniciales que abarcaron distintas regiones de la Península (*Iglesias Castellanas de Reconquista*, 1994–96; *Iglesias de Repoblación del Antiguo Reino de Navarra* (s. IX), 1995–97, e *Iglesias Altomedievales Hispánicas*, 1998–2001) y que pusieron en marcha técnicas analíticas de datación (*Teoría y práctica de la cronología histórica*, 2002–03), y a los que se sumaron la realización de análisis arqueológicos de otros edificios altomedievales singulares (Sta. Lucía del Trampal 1999, Sta. Comba de Bande 1999, S. Gião de Nazaré 2000, Sta. María de Melque 2000–01, S. Millán de Suso 2002, entre otros), el reciente proyecto de investigación se ha centrado en el análisis de la arquitectura de Extremadura, Portugal y Asturias (2004–06) mediante la selección y estudio de algunas iglesias de estas regiones. Precisamente Asturias será el próximo objeto de estudio gracias al nuevo proyecto concedido (2007–09), el cual goza, de acuerdo a lo expuesto, de una sólida base y experiencia.

Tabla 1. Síntesis de las intervenciones llevadas a cabo por el Grupo de Investigación. A partir de [11]

	Nombre	Año	Promotor	Objetivo	Repercusión
1	Sta. Eulalia de Mérida	1991	Administración	Investigación	Científica
2	Torre de Hércules	1992	Administración	Restauración	Restauradora Científica
3	S. Pedro de Arlanza	1993	Equipo	Investigación	Científica
4	S. Pedro de La Nave	1996	Equipo	Investigación	Científica
5	S. Juan de Baños	1996	Equipo	Investigación	Científica
6	Valdetorres de Jarama	1996 2006	Administración	Investigación Restauración	Científica Restauradora
7	S. Vicente del Valle	1997	Equipo	Investigación	Científica
8	Sta. María de Arcos de Tricio	1997	Equipo	Investigación	Científica
9	S. Miguel de Escalada	1998	Equipo	Investigación	Científica
10	Sta. Comba de Bande	1999	Administración	Restauración	Científica
11	S. Estevo de Atán	1999	Administración	Restauración	Científica
12	Sta. Lucía del Trampal	1999	Equipo	Investigación	Científica
13	S. Gião de Nazaré	2001	Administración	Restauración	Científica
14	S. Millán de Suso	2002	Administración	Investigación	Científica
15	Torre de S. Pedro el Viejo, Madrid	2003	Arquitecto	Restauración	Científica
16	S. Pantaleón de Losa	2003	Administración	Restauración	Restauradora Científica
17	S. Martín, Arlucea	2003	Administración	Restauración	Restauradora
18	La Asunción, Viñaspre	2003	Administración	Restauración	Restauradora
19	Sé de Idanha a Velha	2004	Equipo	Investigación	Científica
20	Univ. Alcalá de Henares	2004	Administración	Restauración	Restauradora
21	Los Santiagos, Alburquerque	2005	Equipo	Investigación	Científica
22	Conjuntos industriales en Londres, Inglaterra	2005-07	Entidades privadas	Restauración Construcción	Restauradora
23	Monasterio de Sta. María La Real, Valdeiglesias	2005-07	Administración	Restauración	Restauradora
24	Convento de Santa Clara, Córdoba	2006	Entidad privada	Restauración	Restauradora
25	Basilíca de la Real Colegiata de San Isidoro de León	2006-07	Administración	Restauración	Restauradora
26	S. Miguel de Lillo	2006	Equipo	Investigación	Científica
27	Basilíca de Segóbriga	2006	Equipo	Investigación	Científica
28	Claustro Grande de Sta. María de la Defensión, Jerez	2007	Arquitecto	Restauración	Restauradora
29	Murallas de León	2007	Particular	Investigación	Científica
30	Santiago del Burgo, Zamora	2007	Administración	Restauración	Restauradora
31	Santiago, Villafranca del Bierzo	2007	Administración	Restauración	Restauradora
32	Iglesias asturianas	2007-09	Equipo	Investigación	Científica

Aunque la labor desarrollada por el equipo cuenta ya con una larga trayectoria, como demuestra la extensa bibliografía elaborada [11], precisamente el hermanamiento entre ambas líneas científica y patrimonial ha permitido consolidar recientemente un grupo de investigación formado por personal técnico, en formación (con varias tesis doctorales en marcha) y doctores, cuya formación y especialización se ha beneficiado de los distintos proyectos en los que ha participado. Este hecho se refleja en el notable incremento de los trabajos realizados en los últimos años, tanto con un objetivo científico como asistencial vinculado a la conservación y restauración del patrimonio edificado (Tabla 1).

2.2. ¿Por qué estudiar edificios?

La motivación científica y la oportunidad brindada por los distintos proyectos de investigación y de restauración (Tabla 1) han facilitado el acercamiento a una arquitectura, principalmente de carácter eclesiástica, caracterizada por distintas vicisitudes. Edificios en uso o abandonados, en buen o mal estado de conservación, restaurados o en proceso de, circunstancias todas ellas que justifican *per se* la necesidad de documentar una arquitectura contenedora de una información arqueológica en constante modificación. Una arquitectura que es, ante todo, el reflejo del marco histórico (concepto que comprende aspectos productivos, económicos, políticos y sociales) en el que se originó y, a menudo, el documento más fiable sobre el que leer su historia desde el momento de su construcción hasta nuestros días. Para las épocas sujeto de nuestra investigación, la Tardoantigüedad y el Altomedievo, el edificio supone no sólo el documento más fiable sino, a menudo, el único.

El acercamiento científico a la arquitectura histórica se ha producido habitualmente desde la historia documental, la cual suele hacer referencia a la mención más antigua del lugar o a algún momento de su historia, y la historia de la arquitectura, basada en la epigrafía o en la tipología de ciertos elementos arquitectónicos y decorativos. Pero estos datos no dejan de ser algunos de los puntos referenciales pertenecientes en realidad a una secuencia normalmente desconocida y sólo identificable gracias a la estratigrafía. El análisis estratigráfico prueba además el carácter selectivo de la evidencia documental, la dificultad de asociar el documento escrito con el edificio, así como otros aspectos relacionados con la labor de datación de la arquitectura, como por ejemplo la reutilización de los elementos tipológicos empleados como indicadores cronológicos.

Aunque los catálogos monumentales tanto de carácter nacional como regional constituyen una base del conocimiento cuantitativo de nuestro patrimonio histórico edificado, la labor analítica está aún por realizar, afirmación que puede extenderse a todas las épocas históricas y tipologías arquitectónicas. En este análisis, la arqueología estratigráfica juega un papel fundamental y puede dar respuesta no sólo a la pregunta inmediata de cualquier observador del monumento “¿de cuándo es esta iglesia?”, sino que además resuelve otras tantas cuestiones hasta ahora apenas planteadas por la investigación (y por el visitante): ¿cuándo y cómo se reformó el edificio? ¿cuándo y cómo se volvió a reformar? ¿cuándo y cómo se arruinó?. Estos y otros interrogantes sitúan a la construcción en el punto de mira del análisis arqueológico.

3. PRINCIPALES CASOS ESTUDIADOS

Los trabajos llevados a cabo a lo largo de estos años pueden clasificarse, para su mejor exposición, en dos categorías principales. Por un lado, un grupo se enmarca en proyectos de investigación estrechamente relacionados que se han ocupado y ocupan del estudio de la cultura arquitectónica eclesiástica de la Tardoantigüedad y el Altomedievo de la Península Ibérica. Un segundo grupo de trabajos se ha desarrollado dentro de programas de restauración, recuperación y puesta en valor de monumentos y yacimientos históricos de distintas épocas y tipología gracias a la promoción de entidades públicas (nacionales y regionales) y privadas (fundaciones y arquitectos restauradores).

3.1. Proyectos de investigación

Como ya evidencian las correspondientes publicaciones e informes arqueológicos elaborados por el grupo [11], los resultados obtenidos han modificado en mayor o menor medida la comprensión de la mayoría de los edificios analizados y del periodo histórico del que forman parte, como pretendemos ilustrar con los siguientes resultados obtenidos en algunos de los últimos ejemplos estudiados. Para ello, no nos detendremos en la secuencia pormenorizada de cada uno de ellos, para cuyo conocimiento remitimos a la bibliografía citada en cada caso, sino en aquellos aspectos que ilustran las posibilidades de la arqueología más allá de la estratigrafía, aunque entendida esta siempre como su base fundamental.

La redatación de la iglesia arruinada de *Los Santiagos de Alburquerque* (Badajoz) [12] (Figura 1) llama la atención sobre el riesgo de clasificar los conjuntos edificados de acuerdo a atribuciones tipológicas de elementos que, como la estratigrafía demuestra, están mal catalogados, al margen de que además estén reutilizados. Uno de los relieves con arcos de herradura, que habían funcionado como indicadores cronológicos de esta iglesia, es material de aporte como otros tantos elementos romanos reutilizados en sus muros, mientras que los demás son copias medievales. La primera pieza pasa, por lo tanto, de ser indicador cronológico a elemento incluido y la cronología de la fase primitiva se deriva de la tipología de las pinturas murales conservadas principalmente en el ábside y de los restos del lintel de ladrillo mudéjar que salvaba el vano meridional del aula. Este edificio abandona de esta manera el catálogo de la edificación hispanovisigoda y entra a formar parte del de época bajomedieval afectando, de este modo, a la comprensión de la arquitectura de ambos periodos. El primero acusa su pérdida, teniendo que reajustar sus tipologías, y el segundo se enriquece con un nuevo ejemplo que significa un nuevo tipo.

La identificación de una forma original inédita en la iglesia de *Idanha-a-Velha* (Portugal, Figura 2) supone un nuevo planteamiento para un conjunto que ha sido objeto de numerosas interpretaciones, como la extensa bibliografía al respecto evidencia [13], pero del que nunca antes se había dudado sobre su función primitiva como edificio de culto (iglesia/mezquita, visigoda-islámica-mozárabe). La identificación de una serie de pisos y vanos altos y espacios perimetrales exteriores, todos ellos originales, modifican la planta y estructura tradicionalmente aceptada, lo que impide mantener la interpretación cultural del edificio. Al contrario, se confirma cómo la ruina, intencional o no, de este edificio facilitó su conversión en una iglesia en época bajomedieval. La presencia de dos baptisterios aislados de diferente tipología evidencia un prolongado uso religioso del lugar, pero la iglesia o iglesias antiguas a la que se asociarían están aún por descubrir en su subsuelo.

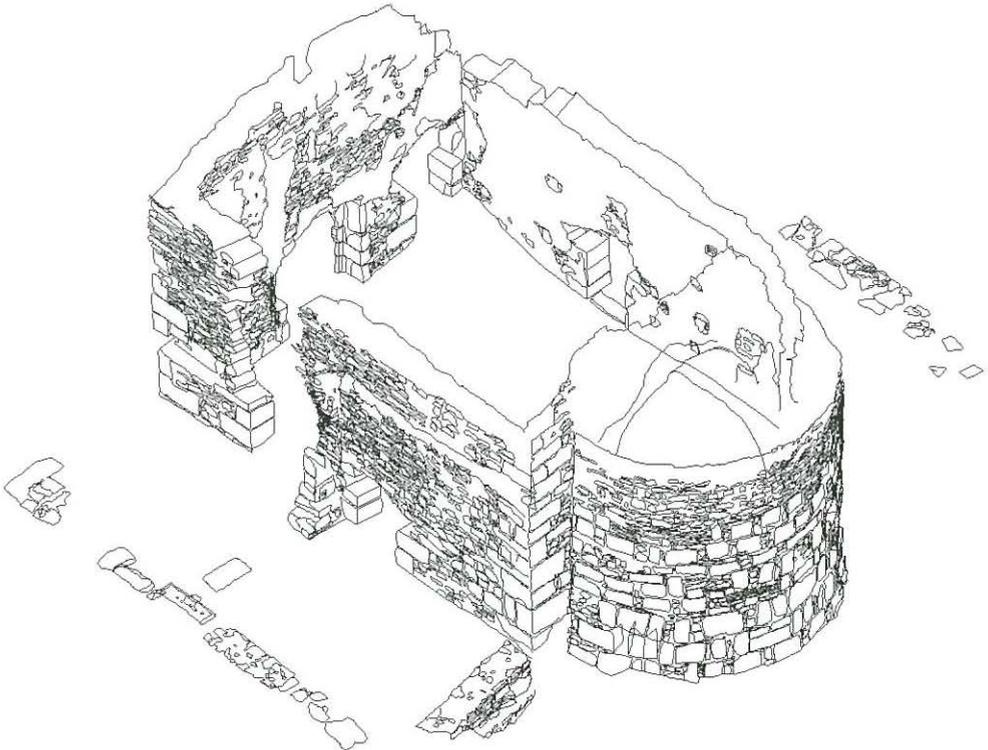


Figura 1. Vista hacia el Noroeste y fotogrametría de Los Santiagos de Alburquerque.

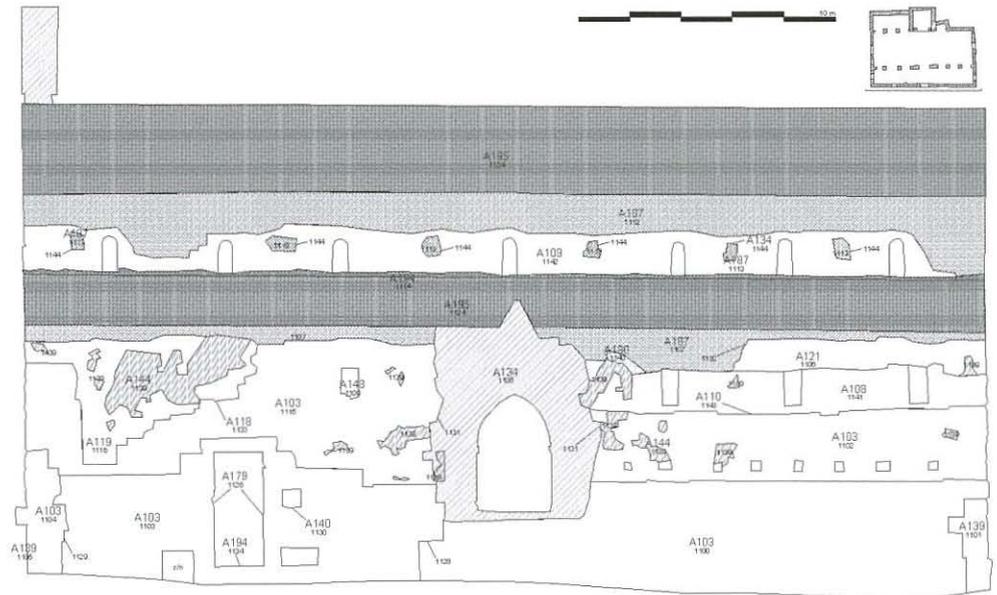


Figura 2. Vista y lectura del alzado meridional de Idanha-a-Velha.

Lo mismo se puede decir de *Segóbriga* (Cuenca) [14] (Figura 3). Esta basílica ha jugado un papel principal en la investigación arqueológica de la época paleocristiana debido a su "extraña" planta y forma y su temprana cronología basada en el hallazgo descontextualizado de unas inscripciones funerarias adscritas a mediados del siglo VI. Excavada de un modo pionero en el siglo XVIII, su reconstrucción se ha basado en los planos contradictorios coetáneos conservados de la época. Gracias a las recientes excavaciones arqueológicas, tuvimos la oportunidad de realizar el análisis estratigráfico de los muros pobremente conservados con la intención de obtener nuevos datos considerando la carencia de estratigrafía de suelo ante las vicisitudes históricas señaladas. La secuencia confirma que un edificio previo fue reutilizado y determinó la planta y estructura del conjunto posterior tradicionalmente interpretado como basílica (Fase II). Este conjunto reutiliza además abundantes materiales decorativos datados en el siglo VII. El resultado afecta directamente a la cronología del edificio, que busca ahora una nueva cronología necesariamente posterior a la defendida hasta ahora y coincidente con la fecha del material reutilizado.

El trabajo de Segóbriga prueba también cómo la estratigrafía de los muros puede ser una solución complementaria en yacimientos que, debido a distintas razones, han perdido la estratigrafía del suelo. S. Pedro de La Nave [15], trasladada en los años 30 desde su emplazamiento original al actual, o Idanha-a-Velha [13], excavada en los años 50, pero sin informes arqueológicos conocidos, son ejemplos de la misma circunstancia.

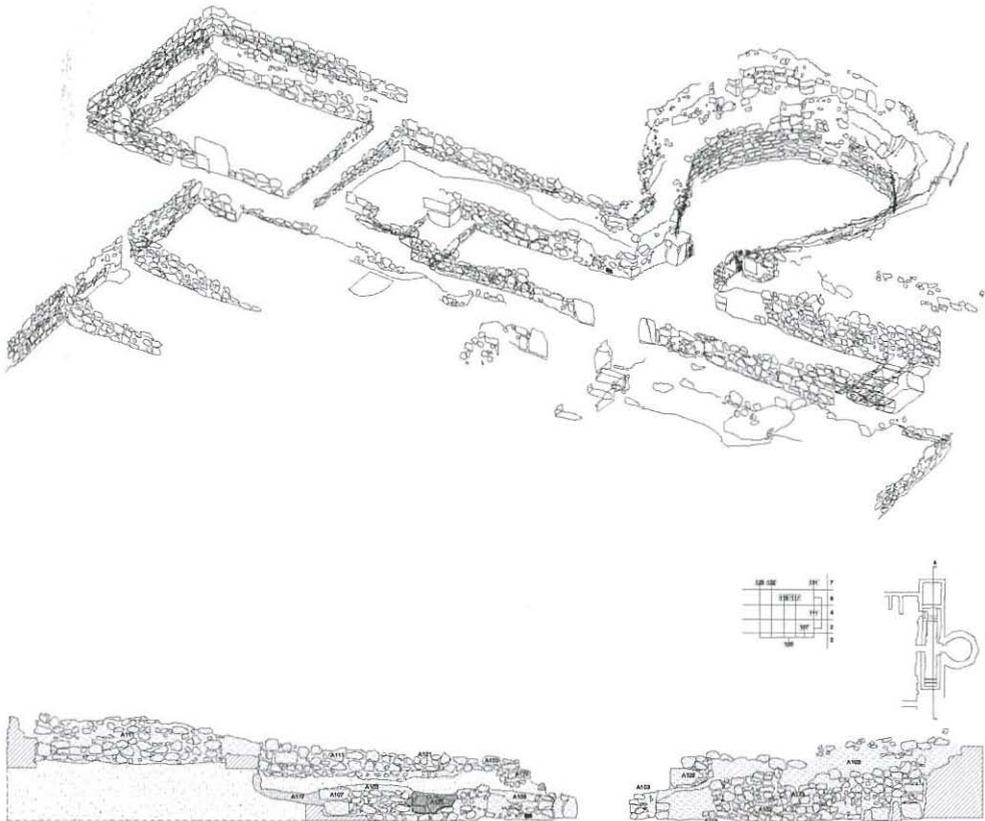


Figura 3. Fotogrametría y lectura del alzado este del espacio transversal de Segóbriga.

Al igual que Segóbriga, la iglesia asturiana de *San Miguel de Lillo* (Oviedo, siglo IX) cuenta a sus espaldas con una extensa bibliografía preocupada por la reconstrucción de su forma primitiva con el fin de entender su singular forma. La lectura de paramentos y el estudio tipológico de sus elementos singulares utilizados en el edificio [16] concluyeron que el proyecto constructivo original (iglesia de salón) fue modificado sobre la marcha, dando lugar a esa serie de peculiaridades o anomalías. Se introdujo un cuerpo oeste gracias a dos gruesos muros que lo dividen en un espacio central y dos cámaras laterales que soportan una tribuna alta con la misma articulación, forzándose así la adaptación de las partes construidas, la reutilización de elementos decorativos y la ejecución de otros nuevos. De esta manera, cobra sentido la presencia de elementos decorativos tallados sobre distintos soportes y con distintos motivos iconográficos pero pertenecientes a un mismo esfuerzo constructivo. La ruina de la zona oriental del edificio, así como las posteriores reformas históricas y contemporáneas han determinado su estructura actual.

Junto a estos ejemplos recientes, se deben recordar los casos ya conocidos de S. Juan de Baños [17], S. Pedro de La Nave [15] o Sta. Comba de Bande [18] (síntesis de todos ellos en [1]). Hay que mencionar también, aunque sea brevemente, la constatación de las dos fases prerrománicas en la iglesia catalogada como románica de S. Pedro de Arlanza [7]; la confirmación de la ejecución en época altomedieval de los tres espacios que conforman Santa Coloma (La Rioja), y no en época romana con alteraciones posteriores como se había defendido hasta el momento [19]; o la ordenación de la secuencia evolutiva de San Millán de Suso con dos fases prerrománicas claramente identificables [20].

3.2. Balance y resultados de los proyectos de investigación

Los resultados obtenidos en estos análisis se suman a los de los proyectos anteriores mencionados (epígrafe 2.1), por lo que tal vez sea hora de hacer balance y reflexionar sobre su efecto en la investigación actual en el estudio de la Tardoantigüedad y el Altomedievo peninsular. Aunque su aceptación por parte de otras corrientes investigadoras haya sido heterogénea, contando así con seguidores [9, 21], detractores [22, 23] y cautos [24], sus resultados han despertado a la investigación correspondiente del letargo en el que se encontraba sumida dando respuesta a algunas preguntas y colocando otras sobre la mesa.

Algunos resultados han zanjado largas discusiones sobre algunos edificios, como era la discutida forma original de S. Miguel de Lillo [16] (Figura 4), las dos supuestas fases altomedievales de Sta. Comba de Bande [18] o la defendida cronología romana de Sta. Coloma [19]. Se ha abierto la puerta a la denominada arqueología de la producción [25] mediante la caracterización y análisis de las diferentes técnicas paramentales y tecnologías constructivas en las distintas fases cronológicas individualizadas en los edificios (síntesis en [26]). Estos resultados constituyen el primer paso para la identificación de talleres constructivos y decorativos que funcionan de manera coetánea en las mismas regiones, como es el caso de las iglesias riojano-burgalesas [27].

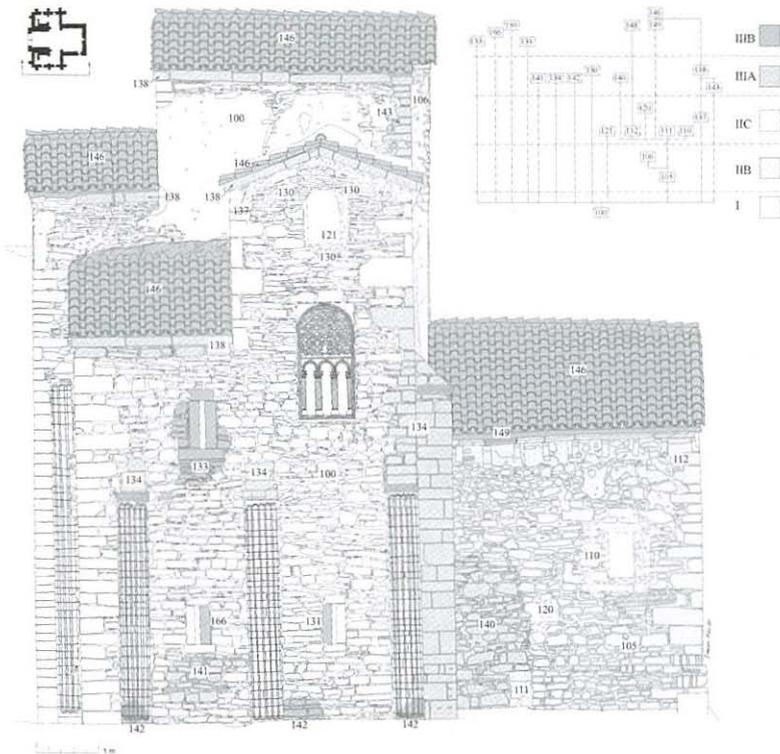


Figura 4. Vista y lectura del alzado meridional de San Miguel de Lillo.

Las atribuciones cronológicas han sido revisadas desde varios frentes. Las dataciones físico-químicas (termoluminiscencia de los ladrillos de las cubiertas abovedadas de Santa Comba de Bande, Figura 5; dendrocronología y carbono 14 de las maderas constructivas de San Juan de Baños y de San Pedro de La Nave; resultados expuestos y contextualizados por Arce y Utrero [1]) insertas en las correspondientes secuencias estratigráficas convierten a los elementos analizados en indicadores cronológicos absolutos para la unidad estratigráfica de la que forman parte y, en consecuencia, debidamente contextualizadas, redundan en la del edificio. La constatación de fenómenos de reutilización de las piezas consideradas hasta hoy como indicadores cronológicos (epígrafe de S. Juan de Baños, capiteles de Sta. Comba de Bande, piezas decoradas de Segóbriga y Nazaré), de distintos talleres decorativos (un maestro que reutiliza sus propias piezas decorativas en S. Pedro de La Nave) o recursos (grupos decorativos reutilizados y nuevos de Baños y S. Gião de Nazaré) presentes al mismo tiempo en un mismo edificio, o la aplicación de la estratigrafía a conjuntos excavados con anterioridad y en los que se han obtenido secuencias inéditas (Sta. Lucía del Trampal) han tenido también notables repercusiones en las cronologías tradicionales y han sacudido los pilares del modelo explicativo vigente.

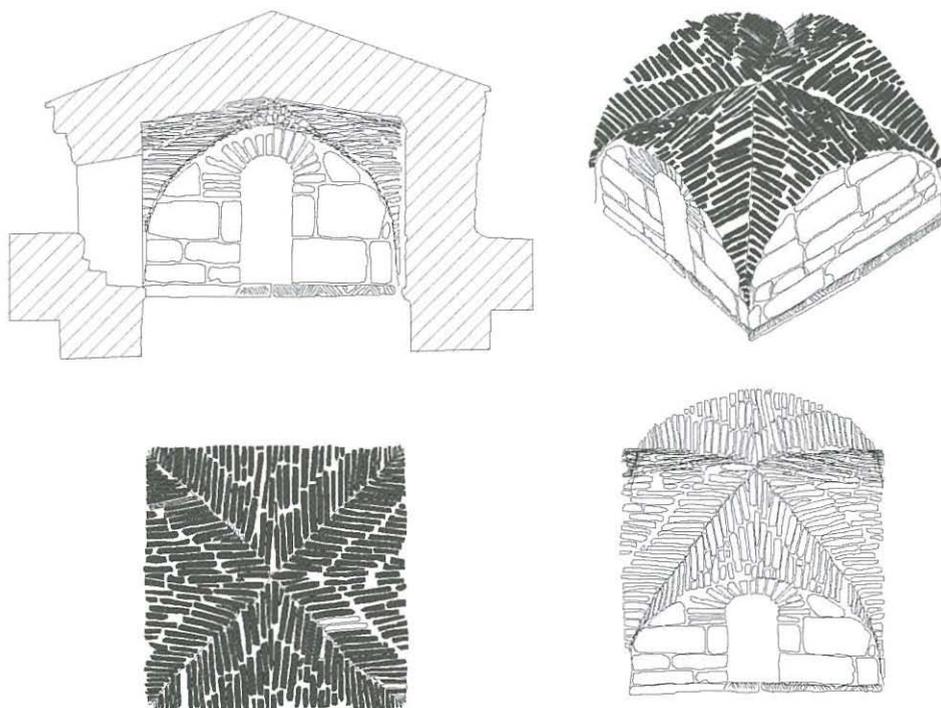


Figura 5. Levantamiento fotogramétrico de las cubiertas abovedadas de Sta. Comba de Bande.

La aplicación de la estratigrafía es notable no sólo en los muros, sino en los entornos de iglesias como Sta. María de Melque [28] o Sta. Lucía del Trampal [29], en las que la constatación de estructuras habitacionales asociadas abre un nuevo campo hasta ahora prácticamente relegado a la interpretación de las fuentes documentales escritas, como es el estudio de los monasterios tardoantiguos y altomedievales [30]. Lo mismo se puede decir de las estructuras documentadas en el conjunto romano de Valdetorres, las cuales revelan la presencia de un asentamiento coetáneo al edificio octogonal conocido, "invisible" para los métodos de registro arqueológicos anteriores ([31], desarrollado dentro del Plan de

yacimientos visitables de la Comunidad de Madrid). Finalmente, la documentación de nuevas iglesias, como la citada de Sta. Lucía del Trampal o las fases prerrománicas de Arlanza, amplía el conjunto de arquitectura altomedieval, introduciendo de este modo nuevos componentes y variables a tener en cuenta en la caracterización de este grupo. Estos ejemplos no sólo modifican la historia de los edificios en cuestión, sino también el estudio del poblamiento de estas épocas. Estas iglesias fueron utilizadas por gentes o poblaciones que no han sido documentadas de otra manera.

Esto es lo que al modelo explicativo se refiere. Pero la metodología también se ha beneficiado de los trabajos realizados, ya que las circunstancias de los edificios analizados han llevado al desarrollo de distintas tácticas adaptadas al objeto de estudio, así como a reflexiones teóricas sobre el propio método [32]. El análisis parcial del perímetro murario de la ciudad de León, el cual se realizó por petición de un proyecto de investigación sobre los campamentos romanos en la Península Ibérica, llevó a optar por un análisis de esquema tipológico. La dimensión y extensión de los paramentos así como los condicionantes de tiempo fueron las razones principales para recurrir al establecimiento de cuadros tipológicos creados a partir de varios grupos de atributos recurrentes y excluyentes. Este método fue en cierta manera ensayado en ejemplos como Idanha-a-Velha o Segóbriga, cuyas fábricas de mampostería y restauraciones superficiales habían encubierto las juntas y difuminado e incluso borrado los límites de las unidades estratigráficas, lo que forzó a prestar mayor atención a los discriminantes tipológicos en el proceso de individualización de las unidades.

Los resultados conjuntos de los proyectos de investigación, aún en marcha, se pueden concretar en la redefinición de la arquitectura de estas épocas mediante la obtención de secuencias constructivas y decorativas que constituyen la base para crear nuevas tipologías. A los argumentos tradicionales de datación, como la epigrafía o las fuentes documentales escritas, se suman ahora los de carácter estratigráfico, lo que da lugar a interpretaciones históricas más rigurosas y abre nuevos campos de estudio (producción, poblamiento). Al mismo tiempo, el método se ha ido nutriendo de estas numerosas y variadas experiencias y se ha movido, de acuerdo a las necesidades particulares de cada edificio y de cada trabajo, entre apuestas estratigráficas y tipológicas.

3.3. Proyectos vinculados a la restauración o recuperación de monumentos históricos

Paralelamente a los trabajos realizados en el marco de los proyectos de investigación, la participación en contratos con la administración pública o entidades privadas ha permitido gozar de un amplio campo de experimentación y desarrollo adicional de la metodología de análisis. Los trabajos realizados testimonian la validez y necesidad de aplicación del método arqueológico en el conocimiento de los edificios históricos y, consecuentemente, en los trabajos de restauración.

Junto a edificios con una cronología original adscrita a época altomedieval, como la mezquita del siglo X identificada en los muros del Convento de Santa Clara (Córdoba, Figura 6) y las primeras fases de la basílica de la Colegiata de San Isidoro de León, se han abordado extensos conjuntos monasteriales de época bajomedieval y moderna, como las crujías de la Cartuja de Jerez de la Frontera (Cádiz) y Sta. María La Real de Valdeiglesias (Madrid), ambos analizados parcialmente hasta el momento. Aquí deben mencionarse, entre otros, también los análisis arqueológicos de iglesias como la de San Estevo de Atán (Lugo) [33], Nuestra Señora de la Asunción de Viñaspre (Álava, Figura 7), San Martín de Arlucea (Álava) [34], San Pantaleón de Losa (Burgos) [35] o la torre de San Pedro el Viejo (Madrid) [36].

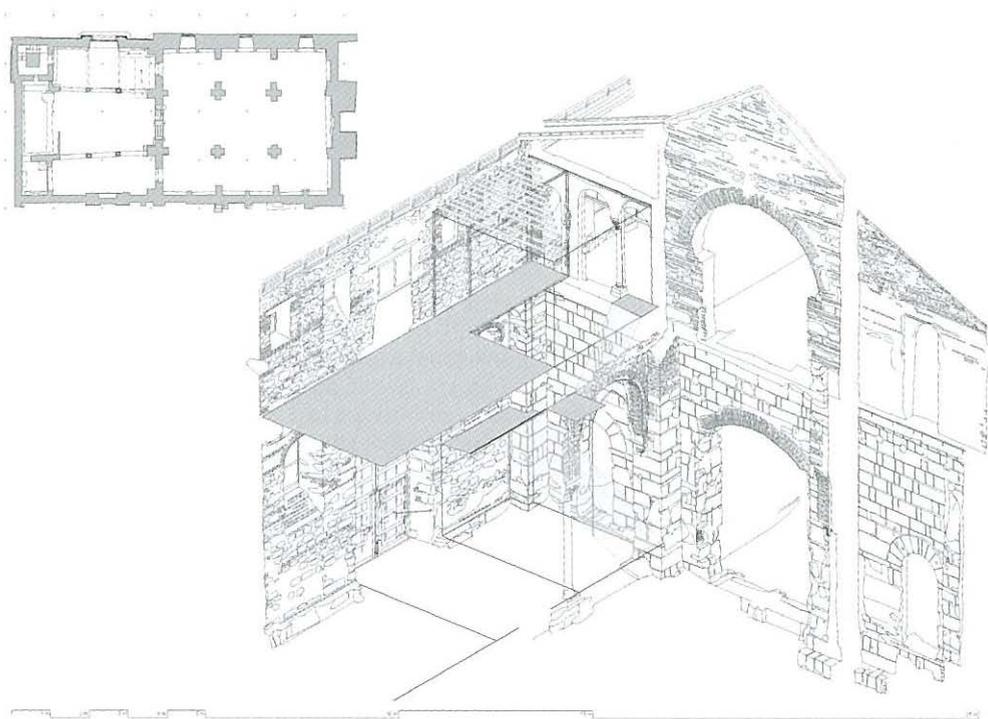


Figura 6. Reconstrucción de las escaleras de época moderna de Sta. Clara de Córdoba.

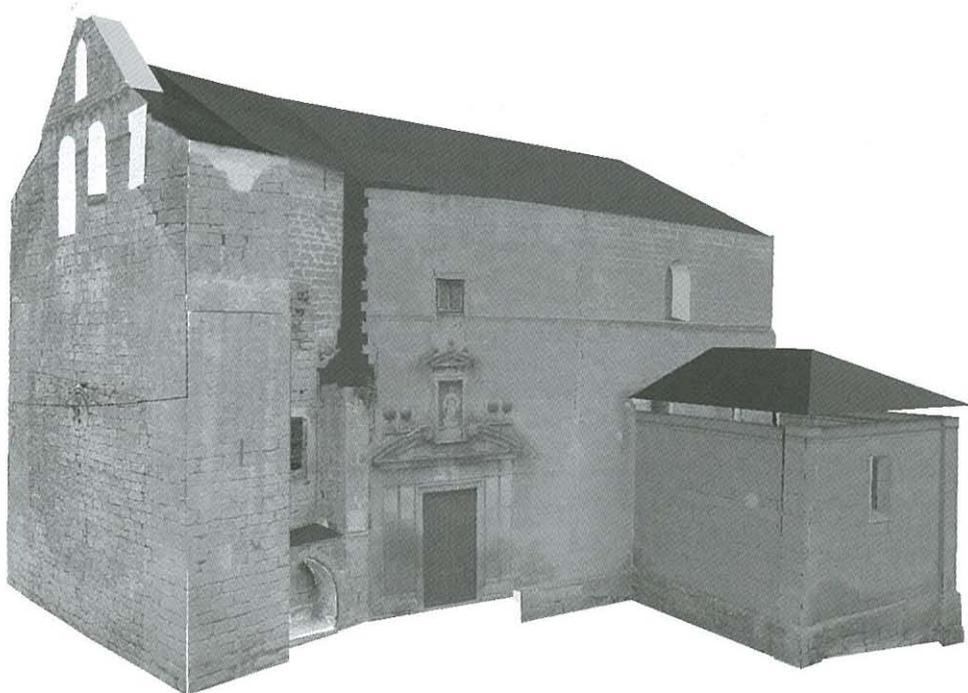


Figura 7. Etapas constructivas de Nuestra Señora de la Asunción de Viñaspre.

Como en el caso de los proyectos de investigación, los trabajos relacionados con las labores de restauración exigen también una valoración reflexiva. Los edificios mencionados estaban en fase de recuperación y restauración y el análisis arqueológico estableció, junto a las secuencias histórico-constructivas, un necesario código de actuación introducido en los correspondientes anteproyectos arquitectónicos de restauración. La distinción de las etapas edilicias, y con ellas de los daños estructurales, funciona como una guía "puesta en fase", cronologizada, para el arquitecto restaurador, quien acomete las obras contando con un conocimiento exhaustivo del edificio que le permite tomar decisiones de cara al efecto de las restauraciones, las cuales son, al fin y al cabo, una nueva etapa del edificio.

A diferencia de los trabajos desarrollados dentro de los proyectos de investigación, en los cuales algunas restauraciones recientes afectaron notablemente la realización de las lecturas paramentales, como ejemplifican las iglesias de San Millán de Suso, con "parches" de enfoscados mimetizados con la piedra histórica, o Idanha-a-Velha, con los paramentos interiores completamente enfoscados, los conjuntos incluidos en anteproyectos de restauración se han visto condicionados por el tipo de encargo. Las lecturas parciales de la Cartuja de Jerez o realizadas en varias fases como la de San Isidoro de León (Figura 8) o Sta. María La Real de Valdeiglesias ofrecen resultados provisionales, no por ello parciales, que permanecen a la espera de confirmación en posibles futuros trabajos.

Sin embargo, la misma naturaleza del encargo evidencia la situación administrativa de los distintos servicios de patrimonio. La Diputación Foral de Álava (Arlucea, Viñaspre), la Comunidad de Madrid (Sta. María La Real de Valdeiglesias, Figura 9) y la Junta de Castilla y León (San Isidoro de León, San Pantaleón de Losa, y los proyectos en curso citados en la Tabla 1) junto a las iniciativas privadas de la Fundación Caja Madrid (Santa Clara de Córdoba) y personales (arquitectos de Jerez de la Frontera y San Pedro el Viejo) han sido algunos de los promotores y financiadores de los trabajos desarrollados. Todas estas iniciativas no dejan de ser aisladas y evidencian la necesidad de generar un marco legislativo común que contemple el patrimonio edificado como sujeto arqueológico. La herramienta se ha desarrollado y los resultados muestran su viabilidad y necesidad, sólo queda crear un marco de actuación acorde (ver epígrafe 4).



Figura 8. Tramo sur del crucero a finales del siglo XIX y estado actual de la Basilica de S. Isidoro.

Por último, no queremos dejar de mencionar la labor desarrollada en el ámbito de la formación tanto de arqueólogos como de arquitectos mediante la participación en cursos de especialización (masteres y doctorados) y congresos de restauración arquitectónica [37-39]. Esta labor tiene un doble objetivo de formación y sensibilización que, como veremos

(epígrafe 4), es fundamental para garantizar el futuro de la disciplina arqueológica y, por supuesto, del conocimiento y puesta en valor del patrimonio edificado.

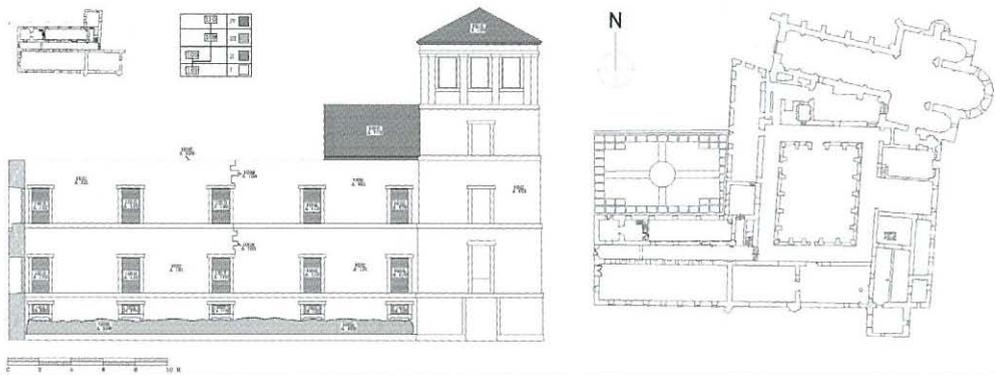


Figura 9. Vista hacia el Oeste y lectura del alzado norte de la crujía meridional de Sta. María La Real.

3.4. Distintos proyectos, misma metodología y resultados

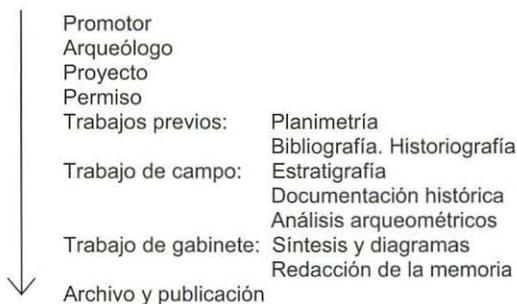
Tanto los proyectos de investigación como aquellos vinculados a los programas de restauración se caracterizan por aspectos comunes. Aunque los trabajos han respondido a distintos objetivos iniciales (Tabla 1), la aplicación del método arqueológico se ha planteado de una misma manera y ha ofrecido idénticos resultados. Los trabajos previos (planimetría e investigación bibliográfica), la labor de campo (análisis estratigráfico y documental) y de

gabinete (síntesis y redacción de la memoria) forman parte siempre del proceso de trabajo (Figura 10 y Tabla 2). El tiempo es la única variable en este proceso, condicionado por los cortos plazos de la administración, más relajados por los de la investigación. Siempre que ha sido posible y sobre la base del análisis estratigráfico, se ha recurrido además a la consecución de datos cronológicos absolutos para situar en un tiempo histórico preciso o, al menos, relacionar las fases establecidas en la secuencia relativa. Estos son los ejemplos de los análisis dendrocronológicos practicados en las maderas de Santa Clara o de composición de morteros en Segóbriga, que vienen a sumarse a otros practicados en los proyectos citados anteriormente (ver epígrafe 3.1). La arqueometría ha encontrado de esta manera en el análisis paramental el marco sobre el cual desarrollar sus análisis y resultados.



Figura 10. Trabajo de campo en el interior de Sta. Clara de Córdoba.

Tabla 2. Esquema del proceso de trabajo seguido en todo tipo de proyecto



4. PERSPECTIVAS FUTURAS

La síntesis de la actividad desarrollada por el grupo de investigación pone de manifiesto varios aspectos complementarios. Las numerosas y variadas experiencias han consolidado una línea de investigación y trabajo que significa una nueva comprensión de la arquitectura, de su historia, de su estado actual y de sus posibilidades futuras como objeto arqueológico y como patrimonio edificado.

Las perspectivas que se abren parecen caminar en la misma dirección. Por un lado, el proyecto de investigación recientemente concedido para el periodo 2007–09 se centrará en la región de Asturias. La documentación planimétrica de los edificios asturianos (L. Arias Páramo) facilita la labor inicial a realizar. Junto a los análisis estratigráficos, se pretende proceder a una labor de prospección que rompa el catálogo clásico de una arquitectura asturiana de naturaleza monumental mediante la identificación de otros conjuntos coetáneos pero ignorados por la investigación tradicional. Esta labor exigirá, posiblemente, el desarrollo de una herramienta eficaz. La aparente homogeneidad de este grupo arquitectónico deberá ser testada en términos constructivos y decorativos.

En el campo de la intervención en el patrimonio edificado, la carencia de una reglamentación sobre la necesaria aplicación de la Arqueología de la Arquitectura es el obstáculo a superar. Aunque las propias experiencias demuestran la creciente introducción y conocimiento por parte de las administraciones correspondientes, a lo que debe sumarse la experiencia desarrollada por otros grupos de trabajo en la Península (recopilación en [40]), es necesario desarrollar una normativa que ampare y garantice la realización este tipo de trabajos, de lo contrario, los promotores o responsables individuales seguirán siendo los únicos clientes.

En este sentido, no creemos que el problema resida únicamente en la carencia de una normativa reguladora y su aplicación sistemática, sino en la incompleta comprensión de la disciplina de la arqueología y del objeto arqueológico, de la analítica y de la restauración, por parte de la administración y de los profesionales de la arqueología y de la arquitectura. Este hecho se refleja en la habitual ejecución de la arqueología de suelo por un equipo según la normativa y en la excepcional o escasa realización del análisis paramental por otro equipo, de manera previa o posterior al anterior, como respuesta a un interés puntual sobre el edificio. Esta situación encierra a su vez un problema profesional, como evidencia la propia formación del grupo de investigación a lo largo de estos años: los “arqueólogos de suelo” muestran un reducido interés por la aplicación de la estratigrafía en los muros, considerados territorio de los arquitectos y del análisis de estructuras. Finalmente, la Arqueología de la Arquitectura debería abandonar el estudio casi exclusivo de los monumentos, como hace la Historia del Arte, y ocuparse de todo tipo de arquitectura, como hace la arqueología del suelo. Si la arqueología se ocupa de documentar, todos los edificios históricos son

yacimientos en los que la arqueología de la arquitectura debe actuar. No sólo debería ser una eficiente herramienta para la restauración, sino también para evitar la destrucción de este documento histórico, como lo hace la arqueología tradicional con el yacimiento del suelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es el resultado de la labor de conjunto desarrollado por el Grupo de Investigación *ArqueoArquit* dirigido por L. Caballero y formado por I. Monteiro, F.J. Moreno, F. Peláez y la autora. No podemos dejar de citar a F. Arce y J.I. Murillo que de hecho son miembros del GI con todas sus consecuencias, aunque lamentablemente el derecho nos impida citarlos como tales. Las aportaciones y correcciones realizadas por L. Caballero y la preparación del material gráfico por J.I. Murillo han sido fundamentales para la elaboración final de este texto.

6. REFERENCIAS

- [1] Arce, F. y Utrero, M.A. (2004): Arqueología de la Arquitectura y Analítica. Aplicación de análisis arqueométricos a partir de la experiencia de la Arqueología de la Arquitectura. *5ª Reunión sobre Técnicas para la Caracterización del Patrimonio. Red Temática del CSIC. Patrimonio Histórico y Cultural*. Madrid (ponencia).
- [2] Arce, F. y Utrero, M.A. (1994/95): Un canal de transmisión de lo clásico en la Alta Edad Media Española. Arquitectura y Escultura de influjo omeya en la Península Ibérica entre mediados del siglo VIII e inicios del siglo X. *Al-Qantara* XV/2: 321-348 y XVI/1: 107-124.
- [3] Quirós, J. A. (2002): Arqueología de la Arquitectura en España. *Arqueología de la Arquitectura* 1: 27-38.
- [4] Brogiolo, G. P. (2002): L'archeologia dell'architettura in Italia nell'ultimo quinquennio (1997-2001). *Arqueología de la Arquitectura* 1: 19-26.
- [5] Rodwell, W. (2005): *The Archaeology of Churches*. Stroud: Tempus.
- [6] López, A. y González, A. (1991): Noticia sobre la segunda restauración de la iglesia de Sant Quirze de Pedret (Cercs, Barcelona). La investigación preliminar. *Quaderns Científics i Tècnics* 3: 231-252.
- [7] Caballero, L., Latorre, P. y Matesanz, P. (1994): La iglesia prerrománica de San Pedro el Viejo (Hortigüela, Burgos). *Numantia* 5: 139-165.
- [8] Caballero, L. y Feijoo, S. (1995): Análisis de elementos constructivos en Santa Eulalia de Mérida-España. *Informes de la Construcción* 46/nº435: 51-62.
- [9] Azkarate, A. (1995): Aportaciones al debate sobre la arquitectura prerrománica peninsular: la iglesia de San Román de Tobillas (Álava). *Archivo Español de Arqueología* 68: 189-214.
- [10] Caballero, L. y Fernández Mier, M. (1997): Análisis arqueológico de construcciones históricas en España. Estado de la cuestión. *Archeologia dell'Architettura* 2: 147-158.
- [11] Caballero, L. (2004): Una experiencia en Arqueología de la Arquitectura. *Arqueología de la Arquitectura* 3: 127-143.
- [12] Caballero, L. y Arce, F. (2006): El enigma de una iglesia. La ermita de Santiago de Albuquerque (Badajoz). *Norba-Arte* 25: 5-35.
- [13] Caballero, L. (2006): Aportaciones de la lectura de paramentos a la polémica sobre la Sé de Idanha-a-Velha. En *Seminário Internacional al-Ândalus. Espaço de mudança. Balanço de 25 anos de história e arqueologia medievais*: 266-273. Mértola: Campo Arqueológico de Mértola.

- [14] Utrero, M.^a Á. (2006): *Lectura de Paramentos de la Basílica de Segóbriga (Saelices, Cuenca). Septiembre 2006*. Madrid: CSIC (informe manuscrito).
- [15] Caballero, L. y Arce, F. (1997): La iglesia de San Pedro de La Nave (Zamora). *Arqueología de la Arquitectura. Archivo Español de Arqueología* 70: 221-274.
- [16] Caballero, L., Arce, F., Utrero, M.^a Á. y Murillo, J. I. (2007): La iglesia de San Miguel de Lillo (Asturias). *Lectura de paramentos. Territorio, sociedad y poder* 2 (en prensa).
- [17] Caballero, L. y Feijoo, S. (1998): La iglesia altomedieval de San Juan Bautista en Baños de Cerrato (Palencia). *Archivo Español de Arqueología* 71: 181-242.
- [18] Caballero, L., Arce, F. y Utrero, M.^a Á. (2004): La iglesia de San Torcuato de Santa Comba de Bande (Orense): *Arqueología de la Arquitectura. Archivo Español de Arqueología* 77: 273-318.
- [19] Caballero, L., Arce, F., Utrero, M.^a Á. (2003): Santa María de los Arcos de Tricio (La Rioja), Santa Coloma (La Rioja) y La Asunción de San Vicente del Valle (Burgos). Tres miembros de una familia arquitectónica. *Arqueología de la Arquitectura* 2: 81-85.
- [20] Caballero, L. (2005): La iglesia de San Millán de la Cogolla de Suso. *Lectura de paramentos 2002*. En I. Gil-Díez Usandizaga (coord.) *Arte Medieval en La Rioja: Prerrománico y Románico*: 13-93. La Rioja: Instituto de Estudios Riojanos, Gobierno de La Rioja.
- [21] Cruz Villalón, M. (2004): Quintanilla de las Viñas en el contexto del Arte Altomedieval. Una revisión de su escultura. *Antigüedad y Cristianismo* XXI: 101-135.
- [22] Arbeiter, A. (2000): Alegato por la riqueza del inventario monumental hispanovisigodo. En L. Caballero y P. Mateos (eds.) *Visigodos y Omeyas. Un debate entre la Antigüedad tardía y la Alta Edad Media*: 249-263. Madrid: CSIC, Anejos de AEspA XXIII.
- [23] Bango, I. (2001): *Arte prerrománico hispano. El arte en la España cristiana de los siglos VI al XI, Summa Artis, Historia General del Arte, VIII-II*. Madrid: Espasa Calpe.
- [24] Collins, R. (2004): *Visigothic Spain 409-711*. Oxford: Blackwell.
- [25] Mannoni, T. y Giannichedda, E. (1996): *Archeologia della produzione*. Torino.
- [26] Caballero, L. y Utrero, M.^a Á. (2005): Una aproximación a las técnicas constructivas de la Alta Edad Media en la Península Ibérica. Entre visigodos y omeyas. *Arqueología de la Arquitectura* 4: 169-192.
- [27] Caballero, L. (2001): Aportación a la arquitectura altomedieval española. Definición de un grupo de iglesias castellanas, riojanas y vascas. En *V Congreso de Arqueología Medieval Española*, vol. 1: 221-233. Valladolid.
- [28] Caballero, L. y Murillo, J. I. (2005): Notas sobre las cercas y murallas en Santa María de Melque. En *Congreso Espacios fortificados en la provincia de Toledo*: 257-291. Toledo.
- [29] Caballero, L. y Sáez, F. (1999): *La iglesia Mozárabe de Santa Lucía del Trampal, Alcuéscar (Cáceres). Arqueología y arquitectura*. Mérida: Memorias de Arqueología Extremeña 2.
- [30] Moreno, F. J. (2007 en prensa): La configuración arquitectónica del monasterio hispano entre la Tardoantigüedad y el Altomedievo. Balance historiográfico y nuevas perspectivas. En *I Jornadas Complutenses de Arte Medieval - Seminario Internacional Complutense "Cien años de investigación sobre arquitectura medieval española"*. Madrid: Universidad Complutense.
- [31] Murillo, J. I. (2006): *Actuación arqueológica en el entorno y zona de afección del centro de Interpretación de la "Villa de Valdeterres de Jarama" Madrid*. Madrid: Consejería de Cultura y Deportes de la Comunidad de Madrid (informe arqueológico manuscrito).
- [32] Murillo, J. I. y Utrero, M.^a Á. (2004): Las lagunas estratigráficas y las superficies negativas en arqueología. *Arqueología de la Arquitectura* 3: 163-171.

- [33] Arce, F. y Utrero, M^a A. (2003): The archaeological study of San Esteban de Atán (Lugo-Spain). A Pre-Romanesque, Romanesque or Modern church?. En X. M. Ayán, R. Blanco y P. Mañana (eds.): *Archaeotecture: Archaeology of Architecture*: 197-204. BAR (British Archaeological Reports) International Series, 1175. Oxford: Archaeopress.
- [34] Murillo, J. I. (2004): Iglesia de San Martín de Arlucea (Álava). *Arkeoikuska* 2003: 252-254.
- [35] Caballero, L., Murillo, J. I. y Núñez, M. (2005): Un ejemplo de Arqueología de la Arquitectura: la iglesia de San Pantaleón de Losa. *Patrimonio Histórico de Castilla y León* 21: 23-34.
- [36] Caballero, L. y Murillo, J. I. (2004): Cómo se construye una torre mudéjar. La torre de la iglesia de San Pedro el Viejo de Madrid. *Arqueología de la Arquitectura* 3: 39-60.
- [37] Caballero, L., Vela, F. y Utrero, M.^a Á. *I Curso de Análisis Arqueológico de Construcciones Históricas "Arqueología de la Arquitectura. Metodología y Práctica"*, Centro de Investigación de Arquitectura Tradicional, Boceguillas (Segovia), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Julio 2005.
- [38] Caballero, L. (2006): Arqueología de la Arquitectura. Conocimiento e intervención. En *Conferências Património Arquitectónico. Registo, interpretação e criterios de intervenção, Património estudos* 9: 33-43. IPPAR: Lisboa.
- [39] Caballero, L. (2006): Arqueología de la Arquitectura. Conocimiento y restauración, *Actas del IV Congreso Internacional "Restaurar la memoria"*: 161-180. AR&PA: Valladolid, 2004.
- [40] Murillo, J. I. y Sánchez, L. (coords. 2004): Sesión de Arqueología de la Arquitectura del IV Congreso de Arqueología Peninsular, 17 de Septiembre de 2004, Faro, Universidade do Algarve, Portugal. *Arqueología de la Arquitectura* 3: 121-203.

EL LABORATORIO DE ARQUEOLoxÍA DA PAISAXE DEL IEGPS: CONTRIBUCIONES DESDE LA ARQUEOLOGÍA AL PATRIMONIO CULTURAL

Felipe Criado-Boado, David Barreiro y César Parcero-Oubiña

*Laboratorio de Arqueoloxía da Paisaxe (LAr)
Instituto de Estudos Galegos Padre Sarmiento (CSIC - Xunta de Galicia)
Rúa San Roque, 2; 15704 Santiago de Compostela*

1. PATRIMONIO, ARQUEOLOGÍA

El concepto de Patrimonio ha cambiado mucho. Surge con claridad a inicios del siglo XX, como tantas otras cosas que acompañan a la Modernización occidental. Durante la mayor parte de ese siglo se denominó *Patrimonio Artístico*, subrayándose de este modo la primacía de una mirada estética y puramente objetual. Sólo en torno a 1980 se transformó en *Patrimonio Histórico*, cuando se empezó a considerar como producto y reflejo (documento por tanto) de pasadas épocas históricas. Y ya hacia fines de siglo se transforma en *Patrimonio Cultural*, cuando predomina una visión social, culturalista, plural y diversa de todo lo que constituye el Patrimonio creado por la Humanidad.

La Arqueología también ha sufrido grandes transformaciones. El cambio fundamental ha sido precisamente su incorporación como disciplina práctica a la gestión (protección, estudio, recuperación y revalorización) del Patrimonio y, consiguientemente, la irrupción pujante de una actividad profesional que ha sacado a la Arqueología por primera vez del mundo académico y de la estricta investigación desinteresada.

2. EL LABORATORIO DE ARQUEOLOxÍA DA PAISAXE

El entrecruzamiento de la Arqueología y el Patrimonio produce el lugar en el que desarrolla su actividad el actual Laboratorio de Arqueoloxía da Paisaxe (LAr), dependiente del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y con estrechos lazos de colaboración con la Universidad de Santiago de Compostela. El LAr es una unidad autofinanciada de investigación, formación y servicios. Ello quiere decir que su *razón de ser* es la investigación y la formación, y su *modo de ser* el servicio.

Esta unidad de investigación nació en el año 1991 en la Universidad de Santiago de Compostela (USC) como Grupo de Investigación en Arqueología del Paisaje (de hecho su origen se remonta al año 1987, pero en aquel momento todavía no se habían definido los grupos de investigación universitarios). En el año 1997 constituye el *Laboratorio de Arqueología y Formas Culturales* (LAFC), incorporado al Instituto de Investigaciones Tecnológicas (IIT) de esa Universidad. En el año 2001 se integra al *Instituto de Estudos Galegos Padre Sarmiento* (IEGPS), reconvertido desde marzo de 2000 en Centro Mixto del CSIC y la Xunta de Galicia. Actualmente el Grupo de Investigación está distribuido entre el *Laboratorio de Arqueoloxía da Paisaxe* del IEGPS y el *Laboratorio de Paleoambiente, Patrimonio y Paisaje* (LPPP) del IIT de la USC, denominación que adquirió el anterior LAFC en el año 2003, y que está vinculado al CSIC como Unidad Asociada.

El LAr desarrolla un programa sistemático e integral de investigación basado en la Arqueología del Paisaje y orientado hacia la gestión del Patrimonio Cultural mediante la Arqueología. Combina el ideal teórico con el pragmático, la investigación básica con la aplicada, el talante crítico y reflexivo de las Ciencias Sociales y Humanas (que poseen la *capacidad de incrementar la autoconciencia de nuestras sociedades* participando en la vida social misma y arriesgando

la autoconciencia de nuestras sociedades participando en la vida social misma y arriesgando una *continua interrelación entre la teoría y la práctica* que empieza por la vinculación entre el conocimiento y su aplicación) con la pretensión de *transformar la ciencia en economía del conocimiento* (buscando una interacción productiva con el sector económico-industrial, generando productos a partir de la investigación que originen riqueza y puestos de trabajo, y promoviendo una transformación activa de la sociedad a través de la investigación). Un ejemplo de la complejidad actual de la práctica arqueológica la aporta el hecho de que una investigación realizada en el seno del LAr (concretamente por César González Pérez) sobre tecnologías de la información aplicadas al Patrimonio y Arqueología, se ha convertido recientemente en el estándar australiano para la programación de metaobjetos y está en fase de evaluación por ISO para establecerse como estándar internacional; en principio, nada de esto tiene que ver ni con la Arqueología ni con el Patrimonio. Pero las semejanzas y desemejanzas son siempre meras apariencias; como Lévi-Strauss preconiza, conviene buscar la lógica que aproxima dominios o ámbitos de la realidad que en principio parecen distantes entre sí. Con esa mentalidad, el LAr trabaja en Patrimonio y Arqueología, sabiendo que en realidad podemos trabajar en y para otras cosas distintas.

3. NUESTRA ACTIVIDAD: LA ARQUEOLOGÍA



3.1. La Arqueología, desde dos puntos de vista

En el Laboratorio de Arqueología da Paisaxe entendemos por Arqueología dos cosas:

En primer lugar, y en un sentido si no tradicional al menos habitual, la comprendemos como una práctica pegada al pasado, como una acción que produce conocimiento y pivota en torno al concepto de Registro Arqueológico (auténtico concepto fundador y rector de la práctica arqueológica y que, para aclarar los términos, concebimos como un conjunto de formas originadas por la acción social y configuradas por orientaciones específicas de la razón hacia el mundo). Ésta práctica está vinculada a la investigación. Y se concreta en una **definición 1** de Arqueología concebida como: *disciplina que interpreta, a través de los vestigios de la cultura material, los procesos socioculturales de construcción de la realidad en el pasado*. Esta posición entiende la arqueología realmente como una Arqueo-logía, una práctica que construye una inteligencia de la realidad social basada en el examen de la correspondencia entre ésta y la cultura material que la produce y representa y que, debido a la física del espacio-tiempo, se nos

aparece no como cultura material pura sino en forma de piezas, vestigios o indicios, lo que denominamos *registro arqueológico*. Como tal, la Arqueología se puede aplicar a cualquier época y no sólo a las etapas prehistóricas de la Humanidad. Es más, su aplicación a etapas recientes duplica su rentabilidad, pues aquélla se beneficiará de una mayor y mejor cantidad de información y éstas se aprovecharán de un conocimiento adicional.

En segundo lugar, y en un sentido francamente menos frecuente y más llamativo, comprendemos la Arqueología como una práctica en el presente, como un conocimiento para la acción que gira, en este caso, en torno al concepto rector de Patrimonio Arqueológico (que concebimos como la huella –física, material- de la memoria –lo que el Poder y la identidad recuerda- y del olvido –lo que el Poder y el Tiempo han silenciado de otras identidades y otros tiempos). Esta práctica está vinculada a la Gestión y comprometida con el servicio; es una práctica positiva y se organiza bajo el modelo de la transferencia de conocimiento. Y se concreta por su parte en una **definición 2** de Arqueología concebida como: una *tecnología para la Gestión Integral del Patrimonio Cultural, entendiendo por 'gestión' su protección, estudio, recuperación y revalorización*. Esta es una propuesta que ya arriesgamos en un trabajo de 1995 (publicado en TP). En la actualidad todavía vamos un poco más allá y planteamos directamente, en correlación directa con los avances del denominado (*yo prefiero el término*) campo CTS (ciencia-tecnología-sociedad) la adaptación de la Arqueología como tecno-ciencia; si se entiende por **tecnociencia** la forma de acceso cognitivo al mundo que no se limita a analizar la realidad y generar un conocimiento autosuficiente (como la ciencia en su sentido tradicional) sino que construye y transforma la realidad mediante su plena inserción en el sistema productivo, debemos entender por Arqueología Tecno-Científica aquella arqueología que no se conforma con generar conocimiento sobre los procesos de producción socio-cultural de la realidad (en el pasado y en el presente) a través del análisis del registro arqueológico, sino que pretende jugar un papel en las dinámicas de construcción y transformación de la realidad en el presente, a través de su plena inserción en las políticas de gestión del Patrimonio Cultural, del Medio Ambiente (del que aquél forma parte), de Ordenación del Territorio y de Desarrollo Social, con el concepto clave de la sostenibilidad como horizonte ideal (más que como condición real) de la acción arqueológica (en la línea que explora nuestro compañero David Barreiro; de hecho estas definiciones son de él).

3.2. Dos programas de investigación

Estas dos concepciones de la Arqueología, en vez de anularse, se complementan activamente. Cada una de ellas de algún modo deconstruye a la otra, pero en vez de porfiar para predominar sobre aquélla, simplemente evita que la otra se convierta en hegemónica y juntas se combinan para generar un constructo positivo, crítico y pragmático capaz de superar las dicotomías fáciles entre investigación y gestión, entre el especialista y el técnico, entre el saber y la práctica, u otras dualidades destructivas y empobrecedoras que han trufado el campo de la Modernidad académica.

Esos dos polos no conforman un esquema diádico o clasificatorio, sino estructural de la práctica arqueológica. Ambas dimensiones se concilian en forma de programas de investigación, que parten de una crítica de la cultura, incluyen un marco epistemológico-teórico (que en Arqueología significa decantarse, en pleno contexto post-positivo, por la interpretación como horizonte cognitivo), buscan descubrir nuestra Racionalidad, y la racionalidad de los *otros* en la Historia, apuestan por el método apuntando a un ideal de objetividad y rigor basándose en la interdisciplinariedad, la multiplicidad de técnicas, el desarrollo metodológico continuo, la estandarización de procedimientos, el consenso práctico entre la comunidad de especialistas y la innovación, combinan la práctica científica con la necesidad centrándose en una investigación básica comprometida y orientándose a la satisfacción de demandas sociales concretas, procuran generar recursos e, incluso, desarrollo económico, y alientan un compromiso social y comunitario concretado en un anhelo de producción de valor.

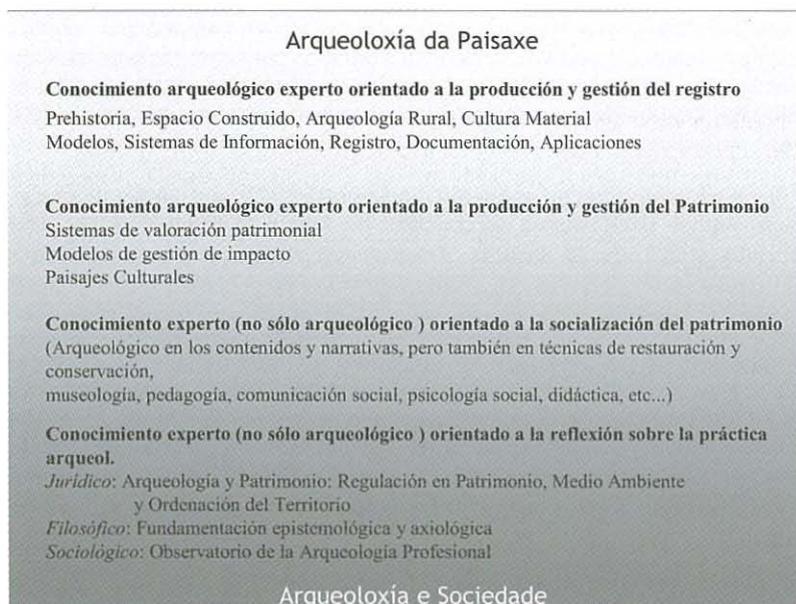
Entendemos que la Arqueología, al igual que cualquier práctica disciplinar o científica, debe articularse en forma de *programas de investigación* reflexivos y sistemáticos. Sólo así se puede proveer de una formulación teórica pertinente que incluya reflexiones y dispositivos que le permitan dar cuenta de aquel segmento de lo real que investiga. Un programa de investigación debe incluir: una *ontología* (o ámbito de objetos de estudio), una *epistemología* (que define qué es posible conocer y cómo puede ser conocido), una *base teórica* (que teoriza la relación entre la Cultura Material y el registro arqueológico, entre ambas y la acción socio-cultural pretérita, y entre todo ello y la dimensión socio-cultural de la realidad humana, una *propuesta metodológica* (que presenta los planteamientos, principios y alternativas que orientan la investigación), una *metodología* (o *repertorio de procedimientos* que permite obtener datos y generar conocimiento inédito), un *método* (que define el mecanismo lógico para generar y contrastar hipótesis), unos *modelos interpretativos* (que ofrecen esquemas y argumentos para producir sentido socio-histórico), y una *dimensión crítica* (que elucida los límites y posibilidades de nuestra labor y somete a examen los resultados para ver hasta qué punto son el eco de racionalidades subyacentes).

Esa bidimensionalidad anterior se refleja y reconstruye en los dos programas de investigación esenciales en la labor del LAR: *Arqueología del Espacio* y *Arqueología y Sociedad*. Aunque, en principio, cada uno de ellos se corresponde con cada una de las dos definiciones presentadas de Arqueología, la equivalencia no es directa, ya que ambas definiciones se combinan para delimitar el campo de ejercicio y los planteamientos básicos de cada uno de esos dos programas.

4. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y UNIDADES DE TRABAJO

Cada uno de ellos se concreta en una línea de investigación del LAR: la *Arqueología del Paisaje* (orientada al estudio del *paisaje* concebido como objetivación sobre el medio de prácticas sociales de carácter material e imaginario) y la *Arqueología Aplicada* (entendiendo por ella una práctica social, normativizada, para la producción y socialización del patrimonio arqueológico).

La relación entre ambos programas y líneas de investigación, la resolución gradual del uno en el otro, se representa en el siguiente gráfico:



A partir de estos planteamientos (interpretativos, reflexivos y pragmáticos), se despliegan las líneas, sublíneas, programas y unidades de trabajo del LAr.

1. *Arqueología del Paisaje*

- Arqueología de las formas culturales y del Espacio Construido.
- Análisis territorial del Patrimonio Arqueológico.
- Arte Rupestre Prehistórico.
- Arqueología de la Cultura Material.

2. *Arqueología y Sociedad*

- Arqueología Aplicada: Protección y Gestión del Patrimonio Arqueológico y Cultural de Galicia.
- Patrimonio, Paisajes Culturales y desarrollo.
- Sociología de la Arqueología.
- Revalorización del Patrimonio Arqueológico: Formación, Difusión y Musealización sobre el Patrimonio.

Estas líneas se complementan con las que desarrolla el LPPP y que incluyen investigaciones sobre paleoambiente (dirigidas por el prof. Antonio Martínez Cortizas) y protohistoria y pueblos indoeuropeos (dirigidas por el prof. Marco V. García Quintela), ambas orientadas asimismo a la reconstrucción y diagnosis del Patrimonio (en el primer caso) y a la significación histórica de éste (en el segundo).

4.1. Objetivos, misión y contexto

Los objetivos genéricos de la investigación en Arqueología y Patrimonio que desenvuelve el LAr son:

- Producir investigación de calidad sobre temas de Prehistoria y Arqueología.
- Tender simultáneamente hacia un horizonte de aplicación, potenciando el I+D en Patrimonio, profundizando en la producción de contenidos, valores y criterios de intervención, y aprovechando para todo ello la proximidad entre la investigación básica y su aplicación.
- Contribuir desde el Patrimonio al conocimiento y aplicación reflexiva de temas críticos de nuestra época como el Turismo de calidad, la protección del Medio socio-natural, la Ordenación territorial, el Desarrollo sostenible, la Innovación, la Identidad, la Interculturalidad y la Globalización.

Desde un punto de vista 'tradicional' se podría decir que el LAr dispone de tres áreas principales de actividad: *investigación básica* en Prehistoria y Arqueología (vertebrada fundamentalmente dentro de un programa de investigación en Arqueología del Paisaje), *investigación aplicada* (orientada a la puesta a punto de convenciones y procedimientos de gestión del Patrimonio), y *prestación de servicios* técnicos especializados. Sin embargo creemos que es necesario, por obsoleto y limitado, superar esta clasificación y división del trabajo científico en investigación básica, aplicada y servicios. Es imprescindible sustituir esta visión por un nuevo paradigma que reconozca que en todas esos niveles de la misión científica hay una dimensión básica, otra aplicada y otra finalmente de servicio y valorización. A ello se aplica la práctica del LAr, que se propone cumplir con la exigencia de que la investigación en él desarrollada se comprometa con la actividad productiva, se vincule al desarrollo tecnológico, potencie la transferencia de tecnología, genere riqueza y fomente el empleo.

Para ello el LAr se basa en una filosofía de trabajo de vocación integradora: los resultados derivados de proyectos de investigación que permiten *evaluar la significación histórica* de los bienes arqueológicos e *innovar en metodologías* de trabajo, se reorientan con un sentido

aplicado para transformar ese conocimiento en una *tecnología para la gestión actual del Patrimonio Arqueológico*, y se transfieren al entorno social y productivo bien como oferta de servicios, bien como productos acabados que puedan ser utilizados por terceros, bien como publicaciones de carácter especializado o divulgativo, o bien como iniciativas de formación especializada. Con ello se pretende contribuir al *incremento del conocimiento sobre el pasado* y, simultáneamente, al *desarrollo de una gestión integral del Patrimonio* (tanto Arqueológico como Cultural) producido por ese pasado mediante la *innovación y el desarrollo de tecnologías* que permitan localizar-intervenir-valorar-significar-conservar-rentabilizar las entidades patrimoniales y contribuyan a transformar éstas en valores culturales y recursos socioeconómicos. (Estos serían los *objetivos específicos* del LAr).

Todos los proyectos y actividades del LAr son diseñados como un ciclo completo de investigación y trabajo y aplican una concepción integral de la gestión del Patrimonio Cultural, que intenta articular conocimiento y utilidad práctica, investigación y gestión, como reflejo de la bidimensionalidad de ese Patrimonio, que es simultáneamente *documento* de las sociedades históricas y *recurso* para las sociedades actuales. Propugnar un modelo de *gestión integral del Patrimonio Cultural* implica comprender la práctica arqueológica como una unidad que se inicia en la identificación y recuperación del registro arqueológico, continúa con su valoración y estudio, ofrece soluciones a la administración actual de los bienes que lo integran, posibilita su rentabilización como recurso cultural, y culmina con la divulgación de los resultados del trabajo tanto entre público especializado como general. De este modo los ámbitos principales y sucesivos (cuando se aborda un proyecto en todas sus fases) de gestión del Patrimonio Cultural son: Catalogación, Evaluación (histórica y patrimonial), Intervención y Rentabilización.

El LAr intenta poner en práctica una *apuesta* concreta: pretende contribuir a la reconversión de la Arqueología en una metodología de acción positiva en el presente; pretende hacer esto en un contexto social y teórico que es post-positivo; y pretende hacerlo, además, combinando la satisfacción de las demandas sociales, la producción de conocimiento sobre el pasado y la innovación en procedimientos de trabajo. (Ésta sería la *misión* del LAr).

Los agentes que en la actualidad intervienen en el Patrimonio son múltiples y variados. Ante todo se encuentra la *Administración*, que ejerce (por imperativo constitucional y normativo) una labor de cautela y ordenación en el Patrimonio Cultural y en función de ello autoriza las intervenciones sobre este ámbito de actividad; la depositaria de esta competencia en Galicia es la *Dirección Xeral de Patrimonio Cultural* de la Xunta de Galicia, que es por lo tanto el organismo encargado de proteger y conservar el Patrimonio y de autorizar todas las intervenciones que le afecten. A continuación se encuentran, ante todo, el sector profesional que trabaja en Arqueología y Patrimonio, los organismos y entidades de la Administración (Central, Autonómica o Local) que intervienen en el Patrimonio Arqueológico, el sector empresarial (promotores, proyectistas, contratistas) que se relaciona con el Patrimonio, y finalmente el público general, beneficiario principal y destinatario final del Patrimonio. En manos de todos estos agentes, una adecuada orientación e innovación tecnológica puede producir, mediante la Arqueología y el Patrimonio, un desarrollo sustantivo en el *sector turístico*, en el *crecimiento rural y urbano* ordenado y sostenido, y un *incremento de conciencia social* al mediar en las fórmulas múltiples que adopta la *identidad* y reconstruir la *memoria histórica*. (Este es el *contexto de referencia* de la práctica del LAr).

4.2. Proyectos y actividad

Algunos ejemplos de proyectos realizados por el LAr serían:

- *Emergence of European Communities*, proyecto de investigación financiado por el VI Programa Marco y realizado conjuntamente con grupos de investigación de las Universidades de Göteborg (Suecia), Cambridge y Southampton (Reino Unido).

- *Paleopaisaje y prehistoria del futuro "Parque da Arte Rupestre"* que la Xunta de Galicia está construyendo en Campolameiro (Pontevedra), proyecto PGIDIT02CCP60601PR del Plan Galego de I+D, Programa de Tecnoloxías da Construcción e Conservación do Patrimonio.
- *ContextAR: Contexto Arqueológico e Histórico del Arte Rupestre de Galicia*, proyecto BHA2002-04231-C02-02 del Plan Nacional de I+D.
- Programa de Corrección del Impacto Arqueológico de la Gasificación de Galicia, financiado por Gas Natural.
- Estudio arqueológico de la Vía Rápida de O Morrazo, financiado por la COTOP y realizado en colaboración con diferentes empresas gallegas de arqueología (Terra-Arqueos SL., Arqueoconsulting, Anta da Moura SL, Tomos Conservación Restauración SL, Prospectiva y Análisis Arqueólogos SL, Adro Arqueológica SL).
- Corrección del impacto arqueológico ocasionado por los Planes Eólicos de Eurovento, Acciona Eólica y ECYR (entre otras), financiado por las citadas empresas.

Aunque la actividad central del LAr se realiza en Galicia (tanto por elección y compromiso con nuestro entorno, como por el principio de subsidiariedad implícito que preside la práctica arqueológica), el laboratorio mantiene activas relaciones internacionales que, además de contactos con múltiples grupos de investigación en España y el extranjero y además de incorporación a diferentes redes de investigación (como la Red de Patrimonio del CSIC, la Red 'Emergence of European Communities' del VI Programa Marco, u otras redes sobre Megalitismo, Arte Rupestre, Arqueología Americana o Arqueología de la Arquitectura), involucra proyectos de investigación y actuación en Portugal, Suecia, Dinamarca, Argentina, Chile y Uruguay.

4.3. Ejemplos de algunas publicaciones

- Ayán Vila, X. (2001): Reconstrucciones en castros del Noroeste Peninsular. *Revista de Arqueología* 243: 6-13.
- Barreiro Martínez, D. (2003): Arqueología y Pragmatismo Crítico. Hacia la renovación axiológica de la Arqueología. *Claves de Razón Práctica* 133: 36-41.
- Criado Boado, F. (2000): Walking about Lévi-Strauss. Contributions for an Archaeology of Thought. En C. Holtorf y H. Karlsson (eds.) *Perpectives for the 21st Century. Philosophy and Archaeological Practice*: 277-303. Gotëborg: Bricoleur Press.
- Criado Boado, F. (2001): La Memoria y su huella. Sobre arqueología, patrimonio e identidad. *Claves de Razón Práctica* 115: 36-43.
- Criado Boado, F. (2001): Problems, functions and conditions of archaeological knowledge. *Journal of Social Archaeology* 1(1): 126-146.
- García Quintela, M.V. (2005): Sobre castreños y celtas: historia y comparación. En Gonzalo Ruiz Zapatero (ed.) "Un círculo de lectores: miradas sobre los celtas del NO. de la península ibérica". *Complutum* 16: 185-204.
- Kaal, J., Klaas, G., Nierop, J., Jacobus, M. y Verstraten, M. (2007): Interactions between tannins and goethite- or ferrihydrite-coated quartz sand: influence of pH and evaporation. *Geoderma* 139: 379-387.

Santos Estévez, M. y Criado Boado, F. (2000): Deconstructing rock art spatial grammar in the Galician Bronze Age. En G. Nash (ed.) Signifying Place and Space: World perspectives of rock art and landscape. *British Archaeological Reports, International Series*, 902: 111-122. Oxford: British Archaeological Reports.

Parcero Oubiña, C. (2003): Looking forward in anger: social and political transformations in the Iron Age of the north-western Iberian Peninsula. *European Journal of Archaeology* 6(3): 267-299.

Prieto Martínez, P. (2002): A formal characterisation of ceramics in Galician Bell-Beaker contexts. En D.Gheorghiu y V. Lungu (eds.) *Studia Vasorum* I: 1-18.

4.4. Organización, investigación y servicios

El LAr, dado el tipo de unidad de trabajo que es, enraizada en un organismo público pero autofinanciada, dedicada a la investigación pero orientada al servicio, comprometida con la investigación de calidad pero implicada en procesos de transferencia de conocimiento al entorno con el fin de hacer útil aquél y contribuir así al bienestar de éste, posee una organización compleja y siempre cambiante.

El organigrama actual refleja de algún modo la bidimensionalidad consustancial al LAr. Aunque hemos optado por incluir en una *Unidad de Servicios Arqueológicos* (USAR) toda la oferta de servicios y la actividad de carácter contractual, la dualización entre *thinkers* y *digers* se evita no sólo con el armazón teórico y las orientaciones metodológicas que utilizamos, sino finalmente con soluciones prácticas tan concretas pero eficaces como hacer que cada persona distribuya su capacidad (o perfil) de trabajo entre las tres funciones esenciales: *investigación, servicios y difusión*.

El desarrollo armónico de todos los procesos de trabajo ha requerido que, dentro de las diferentes funciones, se hayan definido *Unidades de trabajo*, es decir, grupos especializados que poseen un objetivo común, una infraestructura o equipamiento compartido y un mismo tipo de especialista. Por el lado de la 'investigación', las Unidades se corresponden casi directamente con las sublíneas de trabajo mencionadas más arriba. En cambio, toda la variedad de trabajos de la dimensión 'servicio', incluyendo las funciones de difusión y divulgación, está concentrada en la Unidad de Servicios Arqueológicos antes citada.

Pegados a esta organización se encuentran dos grupos de investigación de la Universidade de Santiago de Compostela (USC) y enmarcados en el *Laboratorio de Paleoambiente, Patrimonio y Paisaje* (LPPP). Estos dos grupos se vinculan al LAr como una Unidad Asociada desde el año 2001, mediante el correspondiente convenio de asociación entre la citada Universidad y el CSIC. Los dos grupos son: SINCRISIS (del griego 'comparación'), que trabaja en protohistoria, culturas indeoeuropeas, antigüedad, medievalismo y Patrimonio Histórico dentro de una línea de investigación que se puede definir cabalmente como *Antropología Histórica*, bajo la responsabilidad de Marco García Quintela (Prof. Titular de la USC); y GEMAP (Grupo de Estudios medioambientales y del Paleoambiente), que trabaja en paleoambiente, edafología arqueológica, reconstrucción de usos del suelos, historia de la erosión, contaminación antigua, alteración de la piedra... bajo la responsabilidad de Antonio Martínez Cortizas (Catedrático de la USC).

La conjunción e integración entre los tres grupos (LAr, SINCRISIS y GEMAP) ha sido creciente a lo largo de los años, hasta el punto de constituir en la actualidad casi una misma unidad de investigación dotada de una estrategia y proyecto científico integrado y unitario. Eso permite reunir en la actualidad una masa crítica conformada por 10 investigadores de plantilla, 6 contratados postdoctorales y alrededor de 22 personas más incluyendo becarios en formación, en prácticas, técnicos y contratados de proyectos).

Los tres grupos conforman el Nodo de Santiago del Programa de Investigación Consolidar-Ingenio 2010, concedido en la convocatoria 2007 que, además, se lidera desde el LAr. Su título es "Programa de Investigación en Tecnologías para la conservación y revalorización del Patrimonio Cultural" (acrónimo: TCP –Tecnociencia del Patrimonio; código: CSD2007-00058). En este programa participan varios equipos del CSIC (varios de ellos pertenecientes a la Red CSIC de Patrimonio que se presentan asimismo en este volumen), además de las Universidades del País Vasco y Jaén.

La organización del LAr se completa con la *Unidad Técnica*, que agrupa a los técnicos que realizan labores generales de apoyo a la investigación y el trabajo cotidiano (gestión de proyectos, archivos, sistematización de información, mantenimiento de infraestructuras informáticas, delineación y topografía).

En la organización del LAr es fundamental el concepto de *Programa de trabajo* que, en nuestro caso, supera y desplaza totalmente al proyecto como forma tradicional de organizar el trabajo de investigación. En nuestro caso tenemos un concepción mediática, no finalista, de lo que es un proyecto: un medio para trabajar, no el objetivo mismo del trabajo. El programa, en cambio, se define con voluntad finalista pero con un horizonte concreto, orientado a objetivos y determinado por una necesidad o demanda práctica (generalmente externa, aunque también puede ser interna). Un programa, sobre todo si es muy complejo, puede incluir muchos proyectos distintos, cada uno de los cuales apunta a una dimensión, problema o actuación concreta del programa genérico; esta diferencia es muy clara si tomamos como ejemplo un Programa de estudio del Patrimonio Arqueológico afectado por una gran obra pública: dentro de él, que se ajustará a un plazo de tiempo definido, se pueden incardinar actuaciones (siendo cada una un proyecto específico) en diferentes yacimientos, diferentes tipos de actuaciones (evaluación, prospección, sondeos, excavación...), estudios particulares (la cultura material de un sitio o el patrón territorial de un conjunto de sitios) que son factibles de constituir proyectos de investigación (presentables a las correspondientes convocatorias públicas) específicos.

Cada Programa abordado en el LAr, implica definir el equipo humano que trabajará en él (perteneciente de hecho a diferentes unidades de trabajo) y los recursos que se destinarán al mismo. Pero el programa también implicará (además de la estrategia adecuada para conciliar investigación y gestión del Patrimonio) acciones de difusión y divulgación de los resultados del trabajo, de puesta en valor (a veces) de los mismos, de relaciones (incluso) con los medios y (sobre todo) de interrelación con las comunidades (sociales o de especialistas) afectadas por ese trabajo.

El LAr posee una notable capacidad de generar autofinanciación a partir de proyectos competitivos (europeos, nacionales o autonómicos), convenios con instituciones y contratos de prestación de servicios o investigación orientada con empresas y particulares.

La mayor parte de esta financiación se destina a mantener la *plantilla del laboratorio*, que reúne en la actualidad a 24 personas, 10 investigadores (de plantilla, postdoc y en formación) y 14 técnicos, además de un nutrido grupo de colaboradores que participan en las actividades del LAr. Este personal, en formación o prácticas, se incorpora al laboratorio a través de un programa de adaptación profesional para arqueólogos. Estos colaboradores son especialmente postgraduados, pero también se vinculan alumnos de licenciatura que realizan prácticas en el LAr, además de investigadores visitantes y profesionales que realizan estancias de estudio y formación en el laboratorio.

El LAr realiza *cursos de formación y especialización* de diferente tipo, desde cursos de formación continua, a cursos de especialización. En el curso 04-05 y 05-06 ha organizado (conjuntamente con el Departamento de Historia del Arte de la Universidad de Santiago de Compostela y con la Red de Patrimonio Cultural del CSIC) las dos primeras ediciones de un Master, con el título de *Gestión integral del Patrimonio Cultural*.

El grupo de investigación *dirige dos series periódicas*: TAPA, que es un serie de monografías editada por el CSIC (Departamento de Publicaciones) sobre arqueología, paisaje y patrimonio publicada por el CSIC, y CAPA, que es una serie electrónica de cuadernos de trabajo en los que se presentan novedades, datos empíricos, informes de proyectos, memorias de actuaciones o temas de discusión que en la actualidad se publica sólo en versión electrónica. Hasta la fecha se han publicado, entre ambas series, 49 volúmenes (todos ellos están disponibles de forma gratuita en Internet). Ambas series cuentan con consejos de redacción y asesores que incluyen acreditados especialistas españoles y extranjeros.

5. FINALE

Sólo una cosa es cierta: ni el Patrimonio ni la Arqueología han terminado de cambiar. Es inherente a ellas, al igual que a cualquier producción humana, seguir cambiando a medida que la sociedad se transforma y se modifican sus valores y preocupaciones. Modestamente pretendemos seguir esta historia, sin saber a dónde nos llevará, pero sabiendo que como científicos y ciudadanos debemos colaborar en el proceso de transformación hacia una sociedad mejor, más justa y solidaria.

6. REFERENCIAS PRÁCTICAS

La sede central del LAr radica en el Pazo de San Roque de la ciudad de Santiago de Compostela, local al que se mudó el IEGPS en febrero de 2001. Se puede contactar con el LAr a través de las direcciones lar@cesga.es o lppp@usc.es, o a través de la página web www.lppp.usc.es, en la que se puede encontrar información adicional sobre el Laboratorio, así como publicaciones disponibles gratuitamente y otros servicios.



El equipo al completo en diciembre de 2005 (última foto de grupo disponible).

ARQUEOMETALURGIA: HISTORIA Y TECNOLOGIA

Alicia Perea, Barbara Armbruster¹, Ignacio Montero Ruiz y Salvador Rovira Llorens²

*Instituto de Historia
Centro de Ciencias Humanas y Sociales
Albasanz, 26-28
28037 Madrid*

¹ CNRS, UMRS 5608, Maison de la Recherche, Université de Toulouse le Mirail, 5 allées Antonio Machado, F-31058 Toulouse Cedex

² Museo Arqueológico Nacional, Serrano 13, 28001 Madrid.

Resumen: Se presentan las propuestas teóricas y metodológicas que han guiado la investigación del grupo de investigación *Arqueometal*, centrada en la metalurgia desde sus inicios hasta la Edad Media. El análisis elemental mediante XRF, la microscopía electrónica de barrido (MEB) y la metalografía óptica han sido las herramientas utilizadas y han generado un corpus documental de gran magnitud. Toda esta información analítica, junto a la documentación contextual y gráfica de los materiales, constituye un referente único para la historia de la tecnología metalúrgica y su papel en el desarrollo de las sociedades complejas desde la Prehistoria Reciente.

1. INTRODUCCIÓN Y BASES TEÓRICAS

La tecnología metalúrgica ha sido un campo de interés para la Arqueología desde que empezaron a desarrollarse métodos analíticos instrumentales. En la tradicional explicación evolucionista de la historia, la tecnología ha tenido un papel de referencia fundamental. Los avances y mejoras tecnológicas se vinculaban a cambios y avances sociales y económicos. El metal como tecnología desarrollada a partir de la Prehistoria Reciente adquiere un valor informativo de referencia y su estudio se orientó principalmente bajo tres perspectivas:

- 1- Tipología o descripción formal de los objetos, como investigación arqueológica tradicional encaminada a distinguir los fósiles-guía de las diferentes culturas para ordenarlos cronológicamente.
- 2- Historia de la tecnología. Durante gran parte del siglo XX estuvo basada en el análisis elemental, principalmente de los objetos, siendo el interés por los residuos metalúrgicos secundario. Su orientación teórica era estrictamente evolucionista.
- 3- Procedencia de materias primas y metales como explicación de mecanismos de intercambio y relaciones culturales, realizada tanto a través de una aproximación tipológica mediante modelos de dispersión, como una aproximación analítica basada en los modelos de impurezas y recientemente en análisis de isótopos de plomo. Se empiezan a desarrollar nuevos planteamientos teóricos que enriquecen las posibilidades de acercamiento a la sociedad en su conjunto.

Además de estos tres enfoques generalistas, que se suceden en el tiempo, podemos destacar otras perspectivas de investigación que han marcado el rumbo del grupo de investigación de los autores. En primer lugar se encuentra el interés por profundizar en el conocimiento de la especialización artesanal como indicador de la complejidad socioeconómica dentro de una sociedad. La especialización artesanal se considera un factor clave en la economía política de las sociedades complejas.

En segundo lugar, entre las nuevas aproximaciones que engloban la investigación arqueometalúrgica se encuentra el estudio del cambio tecnológico, concebido desde una doble orientación: interna y externa. La interna, que explica el cambio desde el propio sistema tecnológico, es decir considerando lo que cambia y cómo cambia, a partir de los conocimientos preexistentes y de la innovación. Esta parte de la investigación ha estado fuertemente ligada al enfoque de la Historia de la Tecnología. La segunda orientación trata de dar respuesta a la pregunta ¿por qué cambia la tecnología? y aborda la cuestión desde fuera de ella, desde una comprensión de la propia sociedad, de los comportamientos económicos, políticos e ideológicos en los que esa tecnología está inmersa y que, en definitiva, van a ser los factores que desencadenen el cambio a través de los mecanismos de innovación y adopción.

Desde el punto de vista científico, podemos destacar una tendencia que va adquiriendo mayor peso: la interdisciplinariedad, un reto ineludible para cualquier planteamiento científico de éxito. El arqueólogo ya no trabaja aisladamente sino que tiene que entenderse y coordinarse con todo tipo de especialistas y especialidades; este hecho produce un efecto positivo, no solamente desde el punto de vista metodológico, sino teórico, al ampliarse las perspectivas de un trabajo en equipo.

2. TÉCNICAS DE ANÁLISIS APLICADAS

Los estudios sobre tecnología metalúrgica se apoyan en una serie de técnicas analíticas con el fin de obtener una información que posteriormente es interpretada desde el punto de vista histórico. La visión analítica de la cultura material constituye un campo de especialización arqueométrico de amplio futuro, dificultado únicamente por la accesibilidad del objeto arqueológico, las dotaciones de infraestructura de los centros y los recursos económicos destinados a la investigación.

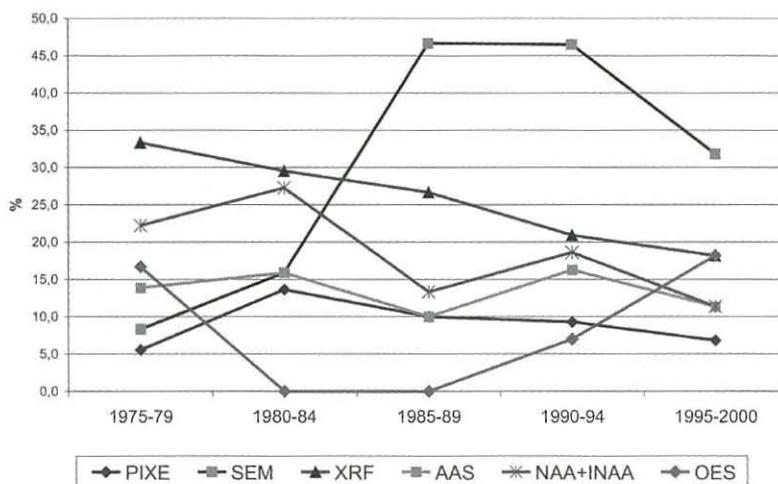


Figura 1. Gráfico que muestra la evolución de las técnicas de análisis más utilizadas en los estudios internacionales de arqueometalurgia en el periodo 1975-2000, según [1]. Se aprecia el peso que adquiere la microscopía electrónica de barrido en la década de los 90.

Una de las primeras cuestiones que se plantean al investigador es la reconstrucción de los procesos de fabricación a través de las huellas que las herramientas dejan sobre la superficie de cualquier objeto metálico y de las estructuras que surgen de los diversos tratamientos térmicos y otros procesos de degradación y cambio en las condiciones del

yacimiento; para ello hemos utilizado la metalografía óptica, con equipamientos propios, pero también ha tenido un papel fundamental la microscopía electrónica de barrido (MEB). La utilización de instrumentos ópticos para la observación topográfica de las superficies metálicas ha sido habitual en la investigación sobre metalurgia, pero la verdadera revolución llegó con la microscopía electrónica de barrido que permitía simultanear, en un mismo equipo, la observación topográfica del objeto a grandes aumentos y con gran profundidad de foco, y la realización de microanálisis no destructivos. El acceso a estos equipos tuvo carácter extraordinario en la arqueología española hasta bien entrada la década de los 80, convirtiéndose rápidamente en un recurso habitual de la investigación a partir de los 90 (Figura 1). En nuestro caso esta metodología ha podido desarrollarse gracias a la estrecha colaboración con el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM, CSIC, Madrid), que cuenta con la infraestructura necesaria y una larga experiencia; el trabajo en equipo ha sido permanente a lo largo de dos décadas [2, 3] En esta trayectoria se sustentan las condiciones imprescindibles para poder plantear un estudio de síntesis sobre los inicios de la tecnología metalúrgica en la Península Ibérica y su desarrollo hasta el fin de la Antigüedad.

Además de los análisis con microsonda (MEB-EDX), las técnicas aplicadas por el grupo de investigación al análisis elemental de los metales han sido principalmente la espectrometría por fluorescencia de rayos X (ED-XRF), y en menor medida PIXE y PIGE. En el caso de la XRF se han empleado equipos orientados específicamente a análisis de metales. Los espectrómetros utilizados han sido un Kevex mod. 7000 entre los años 1982 y 1996 y un Metorex X-MET 920 (Figura 2), desde el 2003 a la actualidad, que permiten la identificación de los elementos químicos presentes en una muestra desde el número atómico 20 (Calcio) en adelante. Así, todos los componentes básicos de las aleaciones metálicas no ferrosas pueden ser identificados (análisis cualitativo) y cuantificados (análisis cuantitativo). Sin embargo, estas características han limitado la investigación sobre objetos de hierro y sobre los subproductos generados en la producción metalúrgica (principalmente escorias) al no permitir el análisis de los elementos ligeros ($N < 20$), básicos en la interpretación y descripción de los mismos.

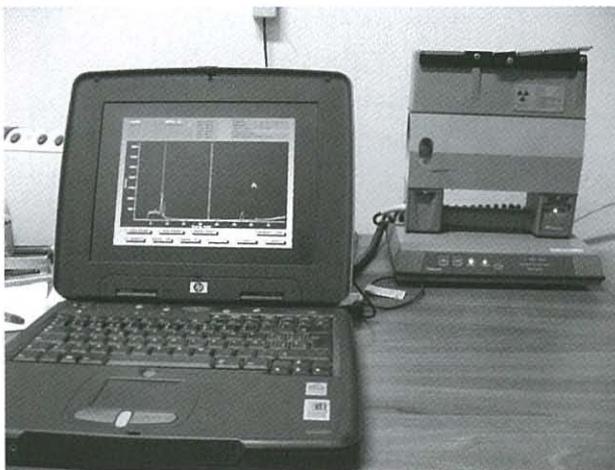


Figura 2. Equipo de espectrometría de fluorescencia de rayos X Metorex X-Met 920 del Museo Arqueológico Nacional. El espectrómetro KEVEX, con fuente de ^{241}Am y detector de Si(Li), fue adquirido en 1982 con dinero de la ayuda americana e instalado en el hoy denominado IPHE, en cuyas instalaciones se desarrolló el trabajo analítico hasta 1996. El espectrómetro Metorex fue adquirido por el Museo Arqueológico Nacional, del Ministerio de Cultura en 2002. En este caso con detector de Si(Li) pero con un cabezal de dos fuentes encapsuladas de excitación primaria por rayos gamma: ^{109}Cd y ^{241}Am .

La utilización de técnicas con haces de iones (IBA), por ejemplo PIXE y PIGE, se han realizado en colaboración con distintos laboratorios y centros de investigación desde 1997, *Laboratoire d'Analyses par Réactions Nucléaires*, en Namur, Bélgica; *Laboratoire des Recherches des Musées de France*, en París (Figura 3); y *Centro di Datazione e Diagnostica*, en Lecce, Italia, así como con los aceleradores que en España dedican parte de sus líneas a analizar el patrimonio histórico, arqueológico y artístico (*Centro Nacional de Aceleradores* de Sevilla y *Centro de Microanálisis de Materiales* del Parque Científico de la Universidad Autónoma de Madrid).

En los últimos años hemos empezado a utilizar otras técnicas de análisis complementarias como los test de microdureza, realizados con equipamiento propio del Instituto de Historia del CSIC, o los análisis de isótopos de Plomo para el estudio de procedencias, encargados al *Servicio de Geocronología y Geoquímica Isotópica* de la Universidad del País Vasco.



Figura 3. Figura antropomorfa en bronce con máscara de oro procedente de Cádiz, delante del detector en el acelerador del CMAM, UMAM. Siglo VIII a.C.

3. HISTORIA Y FORMACIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN ARQUEOMETAL

El trabajo desarrollado por el grupo de investigación *Arqueometal* se encuadra en dos grandes programas de actuación que acumulan una gran cantidad de datos comparativos y permiten estudios tanto puntuales o temáticos, como de síntesis.

El germen del Grupo *Arqueometal* comienza oficialmente en 1993 cuando se inician las actividades de una nueva línea de investigación sobre Arqueometalurgia, con la incorporación de Alicia Perea como Científica Titular al Departamento de Prehistoria del

Instituto de Historia del CSIC. Sin embargo, los inicios reales pueden remontarse a 1985 durante su periodo de Becaria predoctoral, con la realización de la Tesis "Arqueología del Oro: un estudio de la orfebrería prehistórica en el sur de la Península Ibérica" [4, 5].

La actividad investigadora una vez en el CSIC se articuló en torno a un programa de actuación a corto, medio y largo plazo denominado *Proyecto Au* centrado de forma general en la historia de la tecnología, desde la orientación social y antropológica, y concretamente en el proceso diacrónico y dinámico del cambio, la transmisión y la permanencia tecnológicas en la sociedad desde los inicios de la metalurgia hasta el fin de la Antigüedad.

Las necesidades de infraestructura científica en el corto y el medio plazo se resolvieron mediante la colaboración interdisciplinar e interinstitucional, en un principio bajo el marco del acuerdo para dotar de laboratorios de apoyo a la Arqueología firmado por la Dirección General de Bellas Artes del Ministerio de Cultura, y desde 1993 con recursos financieros procedentes de los distintos proyectos de investigación del Plan Nacional de I+D+i de los que la línea de investigación antes mencionada se ha nutrido. Recurrimos fundamentalmente al Laboratorio de Microscopía Electrónica del CENIM, CSIC, dirigido entonces por Miguel Aballe y posteriormente y hasta la fecha por Paloma Adeva, con quienes hemos mantenido una estrecha colaboración científica desde el principio (*vide supra*).

Posteriormente, la línea de investigación sobre Arqueometalurgia se vió reforzada con la incorporación del Científico Titular Ignacio Montero en el año 2000, que viene desarrollando una estrategia coordinada con el programa *Arqueometalurgia de la Península Ibérica*, centrado principalmente en la metalurgia prehistórica de base cobre. El inicio de este segundo programa parte de 1982 por iniciativa de Manuel Fernández Miranda como Director General de Bellas Artes del Ministerio de Cultura, integrándose desde el inicio Salvador Rovira Llorens, actualmente Jefe del Departamento de Conservación del Museo Arqueológico Nacional, como responsable de los trabajos de análisis.

A estas dos temáticas se añade la colaboración con Bárbara Armbruster, investigadora del CNRS francés desde el año 2000, después de publicar su tesis doctoral en torno a los procesos de fabricación del bronce y oro en la fachada atlántica de la Península Ibérica durante la Edad del Bronce [6]. Esta colaboración ha sido constante e institucional a través de la participación en distintos proyectos de investigación [7-10].

Las estrategias creadas para dotar de continuidad y coherencia a nuestros respectivos trabajos de investigación se centraron en los mencionados programas y tenían como objetivo evitar los problemas de descontextualización que habían hecho fracasar, desde el punto de vista de la arqueología, que no desde el arqueométrico, el gran proyecto sobre metalurgia prehistórica de ámbito europeo *Studien zu den Anfängen der Metallurgie*, desarrollado en los laboratorios del Württembergischen Landesmuseum de Stuttgart, con una ingente producción científica [11, 12].

La información se ha ido acumulando a través de más de una docena de proyectos de investigación de diferente naturaleza, regional, nacional e internacional, y también gracias al estudio de materiales de otros proyectos puestos a nuestra disposición, como especialistas, por sus investigadores responsables. Es por ello, que aunque el ámbito de investigación esté centrado en la Península Ibérica, se hayan estudiado materiales de otros países europeos y americanos [13] y se mantenga un amplio círculo de relaciones internacionales.

Las bases de datos generadas en el seno de este grupo de investigación son únicas en su género, por el volumen de datos acumulado; por el carácter sistemático de su planteamiento inicial; y por la metodología empleada que hace uso de diferentes recursos analíticos. Sin

embargo, nunca hemos perdido la orientación arqueológica que tiene como finalidad última la explicación de los mecanismos del cambio social.

3.1. El Proyecto Au

Este programa de investigación surge del concepto de tecnología como un fenómeno indisoluble de su marco social y del agotamiento de la teoría evolucionista, entendida como progreso unidireccional, en la explicación de esos mismos fenómenos tecnológicos. Los metales en general, y en particular los metales nobles, transformados en objetos arqueológicos, poseen una enorme capacidad para transmitir información, no sólo tecnológica, sino ideológica debido a la carga simbólica que encierran. Ese contenido simbólico trasciende su estricto valor económico para relacionarse con aspectos de comunicación, legitimación política o religiosa, pertenencia, exclusión o identificación intra e intergrupales. Por estas razones la escala del tiempo que interesa al *Proyecto Au* es la larga duración, el proceso diacrónico y dinámico del cambio desde los inicios de la metalurgia hasta el fin de la Antigüedad, y más allá.

La trayectoria de esta estrategia de investigación generó una potente herramienta de investigación, el *Repertorio Au de macro y micrografías metalográficas* [14]. Se trata de una amplia base de datos que combina las imágenes y los datos analíticos y viene formándose desde 1985 gracias a diversas colaboraciones institucionales, especialmente con la Unidad de Metalurgia Física del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas, CENIM (CSIC) y también con otros organismos y laboratorios españoles y europeos. Actualmente cuenta con unas 5.000 macrofotografías digitales en color de objetos fundamentalmente en oro y plata (Figura 4), pero también en aleaciones de base cobre, que documentan aspectos técnicos, iconográficos y de conservación de hallazgos y conjuntos arqueológicos procedentes de la Península Ibérica. Al archivo de imágenes macro hay que añadir más de 600 micrografías de estructuras metalográficas tomadas en microscopio electrónico de barrido (MEB), cada una de las cuales cuenta con un número variable de microanálisis por dispersión de energía.



Figura 4. Macro de los componentes estructurales en una de las placas del Tesoro de El Carambolo (Sevilla). Siglo VII a.C.

Esta cifra está constantemente en aumento, según avanzan los distintos proyectos de investigación concretos de los que se nutre. Actualmente el proyecto en vigor "Bases para una investigación arqueométrica y tecnológica sobre metalurgia en la Prehistoria y Antigüedad" del plan Nacional I+D+I (HUM2006-06250/HIST) pretende ser una síntesis del trabajo realizado en las dos últimas décadas.

3.2. Proyecto Arqueometalurgia de la Península Ibérica

Cuenta con una base de datos sobre composición de metales que supera los 20.000 análisis. La mayor parte (17.807) corresponden a análisis de superficie mediante XRF con equipamiento propio desde 1982. Los objetos analizados, principalmente aleaciones de base cobre, y en menor medida objetos de oro, plata y plomo cubren todo el rango cronológico desde el Calcolítico hasta la Edad Media, con algunos materiales contemporáneos. La mayoría de los objetos tienen un solo análisis por muestra, aunque dependiendo del tamaño y estructura de las mismas, se han realizado más análisis. Así por ejemplo, en una fibula cuando esta completa se analiza de manera independiente el puente y la aguja, o en piezas de gran tamaño pueden realizarse dos o más tomas analíticas a lo largo de su longitud. En este conjunto global de análisis también se encuentran aquellos casos estudiados para conocer las diferencias entre la composición de la patina y el metal de base, que han servido para estudiar las tendencias y cambios que se producen según los diferentes elementos presentes.

Por otra parte el estudio de escorias y restos vinculados a la producción metalúrgica realizados con MEB dispone de 5.941 tomas analíticas sobre 1.188 objetos, incluyendo en este caso la metalurgia del hierro. También se dispone de 2.625 imágenes metalográficas sobre distintos materiales (Figura 5) y más recientemente se han empezado a realizar análisis de microdureza con el fin de completar la caracterización física de las producciones metálicas.

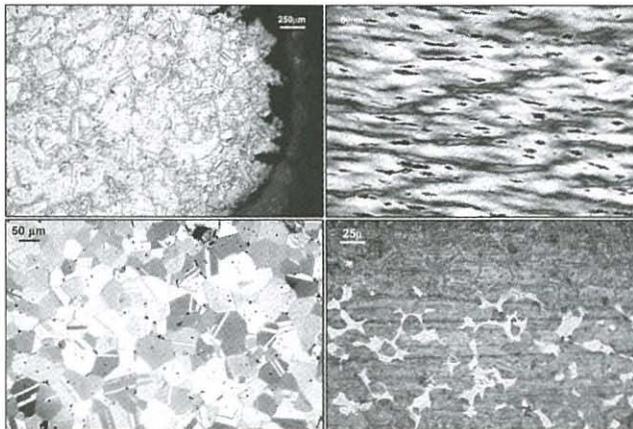


Figura 5. Montaje de micrografías de bronce antiguos. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: Hacha plana del Bronce Tardío, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío y recocido (yacimiento de la Fábrica de Euskalduna, Madrid). Hacha plana del Calcolítico, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío (yacimiento de Cabezo Juré, Alosno, Huelva). Espada del Bronce Final, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío y recocido (depósito de la Ría de Huelva). Molde metálico de hacha de talón, mostrando áreas ricas en Sn (color plateado) en un bronce de alto contenido en estaño (yacimiento de Linares de Riofrío, Salamanca).

Toda esta información analítica está acompañada de la correspondiente información documental sobre las piezas estudiadas, en una ficha con referencia especial a sus datos de contexto cronológico y espacial. Una buena parte de este material cuenta además con información gráfica (fotografía y/o dibujo).

La investigación ha buscado cubrir todo tipo de objetos, desde los elementos más pequeños y cotidianos, a aquellos más singulares. En este conjunto podemos mencionar la existencia 2.228 análisis de monedas de distintos periodos, el análisis de 326 anillos y 202 botones

desde la Edad del Bronce al Mundo Visigodo, 680 análisis sobre hachas de distinta tipología, 1.027 análisis sobre fíbulas y sus componentes, 1.473 análisis realizados sobre minerales principalmente de cobre y plomo, o los 472 de gotas de fundición, sin olvidar elementos más esporádicos como el estudio de hilos metálicos en tejidos [15] o de estatuaria romana.

Tabla 1. Cuantificación de análisis realizados en el Proyecto de Arqueometalurgia de la Península Ibérica; entre paréntesis se incluyen el número de objetos analizados.

	Análisis XRF	Análisis MEB	Imágenes MEB	Metalografía
Nacional	16.698 (14.511)	3.776	4.720 (944)	2.397 (793)
Extranjero	1.109 (873)	977	1.221 (244)	228 (76)
Total	17.807 (15.384)	4.753	5.941 (1.188)	2.625 (869)

En los últimos años se está trabajando sobre otro problema de gran trascendencia en el desarrollo cultural de la Península Ibérica como es el aprovechamiento de la plata y el plomo en el I milenio a.C. en relación a los procesos coloniales y su interacción con el mundo indígena. Esta investigación está siendo realizada a través de proyectos subvencionados por el Ministerio de Educación y Ciencia: "*Caracterización analítica de la producción metalúrgica protohistórica de plata en Cataluña*", (HUM2004-04861-C03-02), periodo 2004-2007 [16, 17], y "*Tecnología y procedencia: plomo y plata en el I milenio AC*", (HUM2007-04861-C03-02), periodo 2007-2010.

4. PRINCIPALES RESULTADOS

Los resultados de la línea de investigación sobre arqueometalurgia y de las dos estrategias que se han sustanciado en más de 300 trabajos publicados de todo tipo, incluida la divulgación científica y el ámbito internacional más especializado, pueden encuadrarse bajo dos epígrafes: metodológico y práctico.

En efecto, una de las contribuciones más interesantes que podemos aportar se centra en la metodología y los protocolos de trabajo que se han ido construyendo con la experiencia investigadora. Su finalidad es evitar en lo posible errores de interpretación en los datos analíticos de objetos arqueológicos, obtenidos generalmente en condiciones desfavorables. Intentamos evitar la casuística para buscar las tendencias, por lo que se aplica a todas las fases de la investigación, desde la selección del objeto de estudio hasta la toma de datos analíticos. Los puntos fundamentales son los siguientes.

- a) Carácter sistemático del muestreo. Nuestro objeto de estudio son grupos o conjuntos de objetos producidos por una formación social identificable, pertenecientes a una fecha concreta o procedente de un área geográfica homogénea, evitando el estudio de objetos aislados, sin datación o sin contexto arqueológico. Creemos que la analítica no debe estar reñida con la arqueología.
- b) La caracterización de cualquier técnica, proceso de desgaste por uso, deterioro o utilización de una herramienta, implica la obtención de una imagen macro o micrográfica junto a su correspondiente análisis de composición. Es decir, intentamos asociar las composiciones elementales a microestructuras.
- c) Salvo para una caracterización elemental genérica de piezas simples, un único análisis no puede ser representativo de una estructura concreta dentro de un objeto o del propio objeto. Esto es especialmente cierto para procesos como los vaciados en las primeras etapas metalúrgicas, o las soldaduras que implican la utilización de diferentes aleaciones y materiales.

En segundo lugar podemos situar los resultados prácticos, es decir, aquellos que se diseñaron para obtener interpretaciones de carácter histórico tecnológico y social. A continuación se detallan unos ejemplos.

4.1. La primera metalurgia en la Península Ibérica

Uno de los grandes temas de investigación en la Prehistoria Reciente es determinar el papel socio-económico de la metalurgia en sus fases iniciales. Para ofrecer datos y respuestas a esta cuestión dentro del debate existente sobre la aparición de las primeras formaciones estatales. En las sociedades complejas y siempre con matices, la producción de objetos de prestigio está estrechamente relacionada con el surgimiento de jefaturas o elites, cuyo poder se mantiene o sustenta con el control sobre los intercambios o sobre la propia producción, mientras que el desarrollo de producciones masivas de objetos utilitarios se vincula a la evolución de sociedades estatales.

Se diseñó una estrategia de ámbito peninsular para el análisis de los objetos y restos de producción metalúrgicos. El esfuerzo permitió recabar información analítica de más de dos millares de piezas y describir las características tecnológicas y su evolución hasta el Bronce Tardío. Esta investigación, además de trazar la evolución tecnológica explicando las condiciones de aparición de las aleaciones naturales (Figura 6) y el momento de aplicación de las aleaciones intencionadas (bronces), ha permitido sustentar la hipótesis de un desarrollo autónomo de la metalurgia en la Península Ibérica y su carácter poco eficiente y especializado. Aunque haya objetos metálicos que tienen funciones instrumentales, el metal no puede considerarse aún un medio de producción plenamente incorporado a la actividad económica; todavía no se ha librado de la carga de ser un bien de prestigio, ligado al status de sus poseedores.

Esta investigación se plasma en la serie de libros publicada bajo el título genérico de *Primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica* [18-20]. En el primer volumen se recogen los resultados de los 2.099 análisis elementales de los materiales estudiados, ordenados por provincias de origen (Figura 7). El segundo volumen recoge el panorama y contexto actualizado sobre la información disponible en cada yacimiento y región peninsular, el tercer volumen aporta el estudio tecnológico de esas producciones a través de la metalografía.

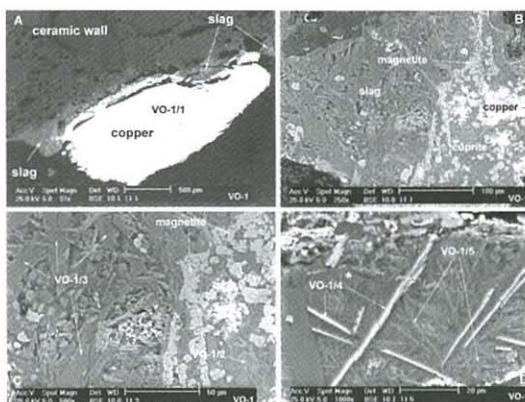


Figura 6. Fragmento de Vasija de Reducción del yacimiento de Villaviciosa de Odón (Madrid). Estudio de la escorificación de la pared interna con MEB, en el que se muestran la estructura de fases de la escoria. La escoria es consecuencia de la reacción parcial a alta temperatura del mineral procesado y de los componentes de la arcilla del recipiente cerámico en un ambiente oxidante.

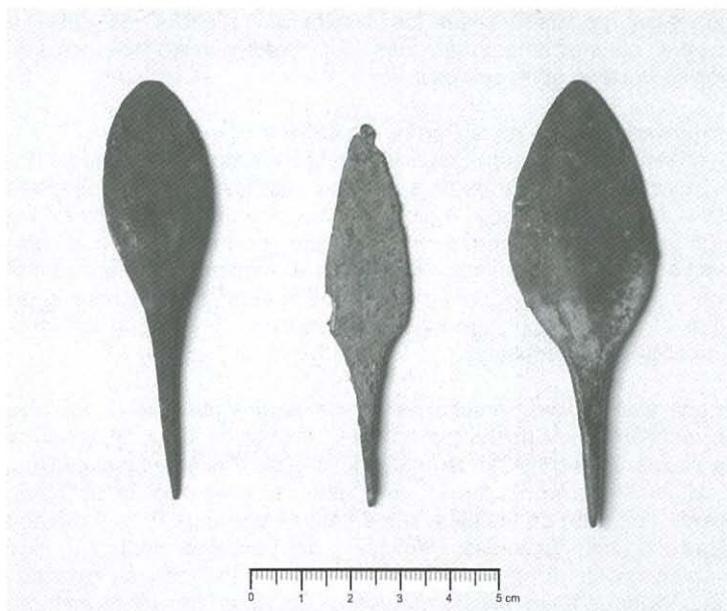


Figura 7. Puntas tipo Palmela del yacimiento de Carrión de los Condes (Palencia) custodiadas en el Museo Arqueológico Nacional (inv. 10271, 10272 y 10.274). Según el análisis elemental se trata de cobres con impurezas de arsénico inferiores al 1%.

El tema no está cerrado y se continúa trabajando con nuevos materiales que van apareciendo en las excavaciones recientes, así como con materiales de zonas peor representadas para ir refinando y matizando las interpretaciones realizadas. Solo gracias a este bagaje documental acumulado es posible plantear trabajos de síntesis global de esta naturaleza.

4.2. Las soldaduras en la orfebrería orientalizante del siglo VII a.C.

Uno de los problemas que plantea la metalurgia del oro mediterránea son las diferentes técnicas de soldadura en granulado y filigrana. Se trata de microsoldaduras que, por sus características morfológicas, han sido difícilmente reproducibles con medios actuales. Esto ha planteado una discusión científica que dura ya más de un siglo en la investigación de la historia de la tecnología del antiguo Mediterráneo.

El tesoro de Aliseda, Cáceres, es un riquísimo ajuar funerario de joyas procedente de un enterramiento múltiple del siglo VII a.C. El conjunto constituye un repertorio completo de lo que se ha denominado orfebrería tartésica, y su estudio ha sido fundamental para la identificación y caracterización de un taller dentro de la producción de la época.

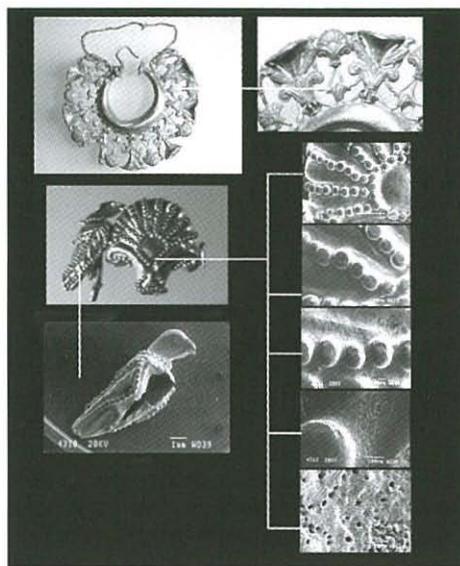


Figura 8. Estudio macro y micrográfico de una de las arracadas de Aliseda (Cáceres). Siglo VII a.C.

El proceso de soldadura de los gránulos de las arracadas de Aliseda está documentado por nosotros mediante un estudio microtopográfico y microanalítico (Figura 8). Se trata de un granulado lineal que resalta los detalles morfológicos de los distintos elementos ornamentales, vegetales y zoomorfos. Se dispone sobre una incisión o surco marcado en la lámina de base previamente impregnado con una mezcla de adhesivo y aleación soldante finamente fraccionada. La composición en la zona de contacto muestra un incremento de los porcentajes de Ag y Cu con respecto a la composición del material de base, un oro bastante puro (Figura 9). Las micrografías muestran una estructura dendrítica, así como corrosión intergranular. A grandes aumentos podemos observar, en algunas soldaduras, microrechupes debidos a desprendimientos gaseosos, probablemente causados por un exceso de aleación soldante en esas zonas.

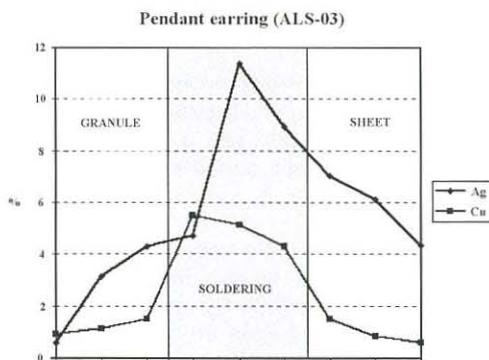


Figura 9. Diagrama con los cambios de composición Au-Ag-Cu en la interfaz lámina-globulo de la arracada de Aliseda.

4.3. Orfebrería Visigoda

La pertinencia y eficacia de la metodología desarrollada a lo largo de estos años quedó suficientemente demostrada en los distintos proyectos de investigación que tuvieron como objeto de investigación la tecnología metalúrgica visigoda; se trataba de trasladar los planteamientos teóricos y metodológicos aplicados a la Prehistoria, a una etapa plenamente histórica, con todos sus riesgos e incertidumbres. Todos ellos fueron financiados por la Comunidad de Madrid (CM 06/0020/1997 y CM 06/0094/1998) y por la Acción Europea COST que nos permitió el acceso a varios laboratorios europeos. La tecnología del oro visigodo era un tema escasamente desarrollado por dos razones, en primer lugar la escasez de material conservado, puesto que la invasión islámica del 711 tuvo como efecto inmediato el pillaje y posterior reciclado de buena parte de la producción orfebre visigoda en la Península; en segundo lugar la dificultad en el acceso a un material muy disperso y de alto valor intrínseco y museístico.

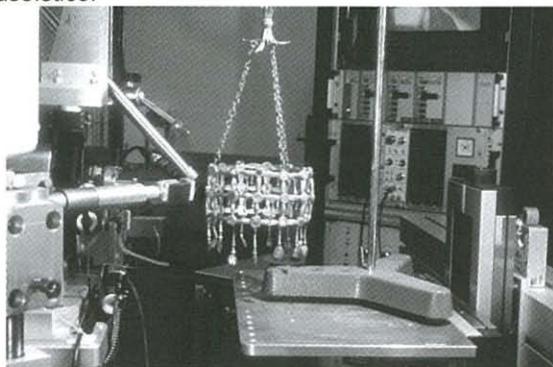


Figura 10. Corona procedente del Tesoro de Guarrazar (Toledo) en el Museo de Cluny delante del detector del acelerador AGLAE del Laboratorio del Louvre. Siglo VII d.C.

La investigación planteaba un doble problema, metodológico y administrativo, puesto que incluía material arqueológico conservado fuera de nuestro país. El resultado del estudio del tesoro de Guarrazar (Toledo), que incluye la corona del rey Recesvinto (649-672), con aplicación de técnicas analíticas que entonces no estaban disponibles en España, como los métodos con haz de iones (Figura 10), fue publicado en una monografía en la que participaron especialistas en diversos campos y de distintos países [21] puesto que la orientación del trabajo fue global, es decir, incluyó la identificación y caracterización de otros materiales como gemas y vidrios artificiales.

No debe extrañar la incursión de nuestras investigaciones en un periodo cronológico tan avanzado como la monarquía visigoda en Hispania, puesto que desde el punto de vista de la tecnología, que fue el hilo conductor de la investigación, se trata todavía de una manifestación inmersa en lo que hemos denominado tecnología antigua, como así se pudo demostrar en la publicación señalada.

Actualmente acaba de concluir el estudio sobre el segundo de los dos grandes y únicos conjuntos de orfebrería visigoda, el tesoro de Torredonjimeno (Jaén) [22], igualmente disperso en varios museos españoles [23]. Su investigación ha deparado sorpresas pues lo que se había interpretado como utilización de aleaciones de bajo contenido en oro, han resultado ser objetos de plata dorados mediante amalgamas de mercurio.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a todos los investigadores que han confiado en nuestra capacidad para estudiar y analizar su material arqueológico; a las Instituciones que han aprobado y subvencionado nuestros proyectos; y a los Museos que nos han confiado parte de sus colecciones, y muy especialmente al Museo Arqueológico Nacional que nos ha proporcionado el espacio y el ambiente adecuado para desarrollar nuestro trabajo hasta el año 2007. Finalmente a todas las personas que de una manera o de otra han participado en la trayectoria del Grupo de Investigación.

6. REFERENCIAS

- [1] Montero, I., García-Heras, M. y López Romero, E. (2007): Arqueometría: cambios y tendencias actuales. *Trabajos de Prehistoria* 64 (1): 23-40.
- [2] Aballe, M., Adeva, P. y Perea, A. (1991): SEM-EDS Microanalytical study of pre-roman gold objects. En W.H. Waldren, J.A. Ensenyat y R.C. Kennard (eds.) *II Deià Conference of Prehistory, Deià (1988)*. B.A.R. International Series 573: 239-266.
- [3] Perea, A., Alguacil, F. J., Adeva, P. y García-Vuelta, O. (2003): Contaminación y conservación de piezas de orfebrería prehistórica ¿Es el oro un metal sin tiempo?. *Revista de Metalurgia* 39: 3-8.
- [4] Perea, A. (1990): Estudio microscópico y microanalítico de las soldaduras y otros procesos técnicos en la orfebrería prehistórica del sur de la Península Ibérica. *Trabajos de Prehistoria* 47: 103-160.
- [5] Perea, A. (1991): *Orfebrería Prerromana. Arqueología del Oro*. Madrid: Comunidad de Madrid / Caja de Madrid.
- [6] Armbruster, B. (2000): *Goldschmiedekunst und Bronzetechnik. Studien zum Metallhandwerk der Atlantischen Bronzezeit auf der Iberischen Halbinsel*. Montagnac: Monographies Instrumentum 15.
- [7] Armbruster, B. y Perea, A. (1994): Tecnología de herramientas rotativas durante el Bronce Final atlántico. El depósito de Villena. *Trabajos de Prehistoria* 51: 69-87.
- [8] Armbruster, B y Perea, A. (2000): Macizo/hueco, soldado/fundido, morfología/tecnología. El ámbito tecnológico castreño a través de los torques con remates en doble escocia. *Trabajos de Prehistoria* 57: 97-114.
- [9] Perea, A. y Armbruster, B. (1998): Cambio tecnológico y contacto entre Atlántico y Mediterráneo: el depósito de El Carambolo, Sevilla. *Trabajos de Prehistoria* 55: 121-138.
- [10] Perea, A., Armbruster, B., Demortier, G. y Montero, I. (2003): Tecnología atlántica para dioses mediterráneos. Los 'candelabros' de oro tipo Lebrija. *Trabajos de Prehistoria* 60: 99-114.
- [11] Junghans, S., Sangmeister, E. y Schröder, M. (1968): *Kupfer u. Bronze in der frühen Metallzeit Europas. Katalog der Analysen 985-10040*. Berlín: Studien zu den Anfängen der Metallurgie, Band 2.
- [12] Hartmann, A. (1982): *Prähistorische Goldfunde aus Europa II*. Berlin: Studien zu den Anfängen der Metallurgie, Band 5.
- [13] Rovira Llorens, S. (1990): *La Metalúrgica en América: Análisis tecnológico de materiales prehispanicos y coloniales*. Madrid: Col. Tesis doctorales. Universidad Complutense. Esta tesis cuenta con 750 análisis de materiales del Museo de América de Madrid. El estudio trata sobre la metalurgia andina.
- [14] Perea, A., Montero, I. y García Vuelta, O. (2004): Project Au and the Au repertoire. A research strategy in gold metallurgy. En A. Perea, I. Montero y O. García-Vuelta (eds.) *Tecnología del oro antiguo: Europa y América. Ancient Gold Technology: America and Europe*. Anejos de Archivo Español de Arqueología XXXII: 139-146. Madrid: CSIC.

- [15] Rovira, S. y Montero, I. (1995): Estudio de los hilos metálicos del Almohadón. En *Vestiduras Pontificales del Arzobispo Rodrigo Ximénez de Rada. S. XIII. Su estudio y Restauración*. Madrid: Ministerio de Cultura: 51-53.
- [16] Armada, X.L., García I Rubert, D., Montero, I., Moreno, I., Rafel, N. y Rovira, C. (2005): Minería y metalurgia durante la I Edad del Hierro. Procesos de cambio en el sur de Catalunya. *Revista d'Arqueologia de Ponent* 15: 133-150.
- [17] Gener, M., Rovira, S., Montero I., Renzi, M., Rafel, N. y Armada X-L. (2007): Análisis de escorias de plomo del poblado de la Edad del Hierro de el Calvari en El Molar (Priorat, Tarragona). En J. Molera, J. Farjas, P. Roura y T. Pradell (eds.) *Avances en Arqueometría 2005. Actas del VI Congreso Ibérico de Arqueometría*: 153-161. Girona: Universitat de Girona.
- [18] Rovira, S., Montero, I. y Consuegra, S. (1997): *La primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. I Análisis de materiales*. Madrid: Instituto Universitario Ortega y Gasset.
- [19] Delibes de Castro, G. y Montero Ruiz, I. (Coords.) (1999): *Las primeras etapas metalúrgicas en la Península Ibérica. II: Estudios regionales*. Madrid: Instituto Universitario Ortega y Gasset.
- [20] Rovira, S. y Gómez Ramos, P. (2003): *Las Primeras Etapas Metalúrgicas en la Península Ibérica. III. Estudios Metalográficos*. Madrid.
- [21] Perea, A. (ed.) (2001): *El Tesoro Visigodo de Guarrazar*. Madrid: CSIC.
- [22] Perea, A., Climent-Font, A., Fernández-Jiménez, M., Enguita, O., Gutierrez, P.C., Calusi, S., Migliori, A. y Montero, I. (2006): The visigothic treasure of Torredonjimeno (Jaén, Spain): A study with IBA techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 249: 638-641.
- [23] Perea, A. (2008): *El tesoro visigodo de Torredonjimeno*. Madrid: CSIC. *En prensa*.

PAISAJES CULTURALES PREINDUSTRIALES. PATRIMONIO Y RECURSOS SOCIALES

***F.-Javier Sánchez-Palencia, Almudena Orejas,
Inés Sastre, María Ruiz del Árbol***

*Instituto de Historia
Centro de Ciencias Humanas y Sociales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Albasanz, 26-28
28037 Madrid*

Resumen: El Grupo de Investigación Estructura Social y Territorio – Arqueología del Paisaje (GI EST-AP) ha desarrollado en las dos últimas décadas una serie de actividades científicas centradas en la investigación, valoración, planificación y difusión de los paisajes culturales como recursos sociales. Sus bases teóricas y metodológicas parten del concepto de paisaje como síntesis cultural de las relaciones sociales y de las comunidades con su entorno, tanto en su génesis por ser el resultado de un proceso histórico, como en su explotación racional actual para fines documentales, formativos y turísticos, por lo tanto de alcance científico y económico a la par. Esta investigación ha permitido alcanzar una serie de objetivos tangibles en ambos campos, particularmente en zonas rurales y mineras de elevado interés y donde existe un rico registro arqueológico de actividades históricas preindustriales, como es el caso paradigmático de Las Médulas. El enfoque interdisciplinar adoptado se sitúa dentro de una de las principales líneas de investigación diseñadas por las instituciones nacionales y europeas en el campo del Patrimonio Histórico, según revelan las tendencias apuntadas por el 7º Programa Marco de la CE, las iniciativas de la ESF y las políticas científicas del propio CSIC y de las administraciones central y autonómicas de España.

1. INTRODUCCIÓN. BASES TEÓRICAS Y METODOLÓGICAS

La investigación del GI EST-AP se articula en torno a la concepción del *paisaje* como síntesis cultural de las relaciones sociales y a la aplicación de métodos y técnicas específicos para su análisis e interpretación. El hecho de que el paisaje se sitúe en el centro de nuestros intereses y que nuestra investigación se defina como “estudio del paisaje” indica que desde los propios planteamientos hemos adoptado como un elemento esencial el contenido patrimonial del mismo. Esto supone, por una parte, una implicación directa en las cuestiones relacionadas con la gestión y protección del Patrimonio Histórico; por eso el tratamiento del registro arqueológico, literario o epigráfico se plantea desde su inicio teniendo en cuenta lo que implica su planificación patrimonial. No obstante y por otro lado, siempre se aborda dicho registro desde un presupuesto fundamental: que el logro de unos resultados de investigación tangibles es el objetivo prioritario.

De este modo, investigación, divulgación y gestión quedan sintetizados en el propio concepto de paisaje, sin que puedan realmente dissociarse: la investigación genera el conocimiento que revaloriza al paisaje dotándole de un sentido histórico, ya que, por muy bello o monumental que sea, la profundidad temporal del paisaje y su complejidad como resultado de un entramado de relaciones sociales no es siempre evidente.

Con estos criterios se han desarrollado proyectos, como más adelante detallaremos, de tipo patrimonial en la Zona Arqueológica de Las Médulas (León), en la Zona Arqueológica de El Cabaco (Salamanca) y, más recientemente, en la Zona Arqueológica de Pino del Oro (Zamora). En ellos lo fundamental ha sido transmitir a través del paisaje nuestro conocimiento sobre los procesos históricos que implicaron a las poblaciones locales y a sus dominadores, sin limitarse a describir las notables morfologías rurales y mineras.

El equipo cuenta, además, con una importante vinculación internacional gracias, sobre todo, a su participación en la Acción COST G2 sobre *Paysages Anciens et Structures Rurales, Textes et Archéologie (PASTA)* y a la posterior coordinación por el propio equipo de una nueva Acción COST A27, *Understanding pre-industrial structures in rural and mining landscapes (LANDMARKS)*.

Nuestro objetivo científico fundamental, básico para la comprensión de los paisajes que investigamos como parte esencial del Patrimonio Histórico, es el estudio de las sociedades provinciales hispanas y sus procesos de cambio, principalmente en la transición del mundo prerromano al romano y en su desarrollo histórico durante el Alto Imperio. El marco geohistórico principal ha sido el Noroeste de la Península Ibérica, en particular el antiguo territorio astur, que se ha ido ampliando con el paso del tiempo a buena parte del Occidente de Hispania (sectores de Lusitania, del territorio cántabro y algunas zonas béticas). Su desarrollo ha dado lugar a importantes aportaciones tanto en el estudio de las sociedades protohistóricas como en el conocimiento de las formaciones sociales provinciales hispanas.

En relación con la época prerromana en el Noroeste, los estudios enfocados desde esta concepción del paisaje han permitido realizar una lectura novedosa del registro arqueológico, tanto dentro de los asentamientos como en el territorio. A partir de aquí se ha realizado una revisión de las formas de organización social, desarrollándose un modelo de economía doméstica dentro de sociedades segmentarias y llamando la atención sobre la no-jerarquización de las comunidades y la independencia espacial de los asentamientos.

En cuanto a la época romana, el estudio se ha centrado en las formas de organización territorial y social del mundo rural, incluyendo como un elemento esencial las zonas mineras. Se ha abordado un amplio abanico de cuestiones como la investigación de técnicas mineras, el estudio del estatuto jurídico del suelo provincial, el trabajo en las minas, el análisis de estructuras agrarias y modelos de poblamiento, así como de fuentes escritas. Ha sido posible la revisión de la imagen tradicional de la influencia romana sobre estos territorios, que resulta ser mucho más profunda y mucho más diversa de lo admitido hasta ahora. Para ello se ha propuesto un modelo social cuya principal característica es la ruralidad y que responde a las formas de organización jurídica, fiscal y administrativa romanas existentes en otras zonas no urbanizadas.

Todo esto ha sido posible gracias a una reflexión teórica y metodológica en torno a la noción de paisaje y las formaciones sociales antiguas. El concepto de paisaje supone un acercamiento integral a las diversas fuentes de información, lo que implica el análisis global de las mismas y el desarrollo de las técnicas necesarias para cada tipo de documento, partiendo de la base de que es incorrecta su jerarquización. Para facilitar esta tarea se ha recurrido a diversas técnicas de tratamiento de datos y de ordenación de la información que permiten ese análisis integral. Además de la elaboración de SIG, se ha procedido a la puesta a punto de una serie de técnicas y documentos que han contribuido a la interpretación de los datos (teledetección, tratamiento informático de datos e imágenes, fotointerpretación, análisis paleoambientales) y a facilitar el análisis morfológico del registro arqueológico (asentamientos y territorios) y epigráfico (soportes y decoración). Esto ha tenido como resultado inmediato la disposición de un conjunto de bases de datos fundamentales para el actual desarrollo de la investigación dentro del equipo.

Los estudios sobre paisajes culturales están demostrando, además, su capacidad integradora, tanto desde el punto de vista científico, por la cooperación de especialistas de muy diversas áreas, como social, por su potencialidad a la hora de facilitar el diálogo entre investigadores, gestores del patrimonio natural y cultural, especialistas en planificación territorial y agentes regionales o locales.

El paisaje es resultado de sucesivos procesos de cambio, un cambio legible básicamente en términos sociales. Por lo tanto cualquier decisión patrimonial relacionada con él requiere asignar protagonismo a esa vertiente social del paisaje: el paisaje como materialización del trabajo, el paisaje como reflejo de formas de poder (incluyendo la creación o destrucción de entidades territoriales), el paisaje como expresión de la concepción de las comunidades, etc.

Los múltiples esfuerzos colectivos por avanzar en proyectos relacionados con la caracterización del paisaje (basados en estudios morfológicos de alta calidad) y su interpretación en términos históricos están dando lugar a un incremento cualitativo y cuantitativo de investigaciones que tienen como eje los paisajes culturales y que cuentan entre sus prioridades con la necesidad de volcar el conocimiento innovador generado en programas de difusión de los resultados del trabajo científico y en intervenciones que contribuyan a mejorar la calidad de vida, sin por ello banalizar los contenidos.

2. PRINCIPALES RESULTADOS ALCANZADOS

Estos planteamientos se han desarrollado en las investigaciones que, desde finales de la década de 1980, nuestro GI desarrolla en el Noroeste de la Península Ibérica. Desde sus inicios, los miembros del GI han mostrado un especial interés por imbricar sus actuaciones y participar activamente en la notable renovación conceptual e instrumental del Patrimonio producida recientemente a escala nacional e internacional, bien a través de reflexiones generales y sobre el concepto de paisaje cultural [1-10] o bien mediante estudios más específicos [11-13] o de alta divulgación, frecuentemente asociadas a montajes expositivos [14-19].

En esencia, nuestros trabajos, articulados en torno a proyectos de investigación, contratos o convenios de alcance local, autonómico, nacional e internacional, se han centrado en varias zonas:

- La Zona Arqueológica de Las Médulas (ZAM), que ha sido ampliamente estudiada por el equipo en las últimas dos décadas. Estas investigaciones se han completado, para contrastar su alcance geohistórico, con estudios en regiones colindantes, la Cuenca Noroccidental del Duero, las Cuencas de Noceda y del Boeza y la Zona de El Caurel, además de toda la comarca del Bierzo, que en la actualidad ha adquirido una particular importancia.
- Nordeste de Lusitania, que ha sido objeto de atención a través de proyectos desarrollados en la provincia de Salamanca, en el área de la Sierra de Francia, en especial en relación con las Zonas Arqueológicas de Las Cavenes (ZAC) de El Cabaco y del Pinalejo y Tenebrilla (ZAPyT) en El Maíllo y Morasverdes.
- El área de poblamiento antiguo vadiniense (noreste de León). Nuestro GI había abordado ya una primera fase de investigaciones en esta zona a partir de la revisión global de los datos disponibles para ella.
- Zona Minera de Pino del Oro (ZoMiPO) (Zamora) y territorio de la antigua *civitas* de los Zoelas, donde se han iniciado los trabajos hace dos años y a raíz de cuya actuación se está desarrollando un acción concertada con la Universidad do Minho (Braga).
- La zona de Gijón-Oviedo, en particular en torno al estudio de la villa romana de Veranes y su territorio, colaborando en ella con el equipo de la Universidad Autónoma de Madrid que dirige los estudios.

Los trabajos llevados a cabo en la ZAM son paradigmáticos de la estrategia adoptada por nuestro GI en la investigación de los paisajes antiguos y en el análisis de los procesos de transformación de las formaciones sociales a partir de sus manifestaciones espaciales. Esta investigación ha guiado la puesta en valor de un paisaje cultural que ha dado prioridad a los procesos históricos frente a la monumentalidad del paisaje. Como es bien sabido, Las Médulas es la mayor mina de oro romana del Noroeste hispano y se ha conservado hasta la actualidad de una manera espectacular (Figura 1). Sin embargo, como nuestro trabajo ha puesto de manifiesto, su importancia va más allá de los monumentales restos de la minería de oro romana, ya que el paisaje de Las Médulas es el producto de los profundos cambios históricos que esa explotación y dominación romanas implicaron. De acuerdo con este punto de partida nuestro trabajo en Las Médulas ha ido más allá del estudio de las técnicas mineras y ha desarrollado estudios diacrónicos que han puesto de relieve los cambios que supuso la presencia romana en la zona.



Figura 1. Las Médulas, panorámica desde el E del principal sector de la mina de oro romana.

Las actuaciones en la ZAM tuvieron un importante precedente en los trabajos realizados en las zonas mineras del suroeste de la provincia de León en los años 70 y comienzos de los 80 del pasado siglo [20, 21]; estos trabajos fueron esenciales para definir el modelo de poblamiento prerromano y romano en este tipo de áreas y sentaron así las bases de los ulteriores trabajos científicos, con enfoques renovados, y de sus aplicaciones patrimoniales.

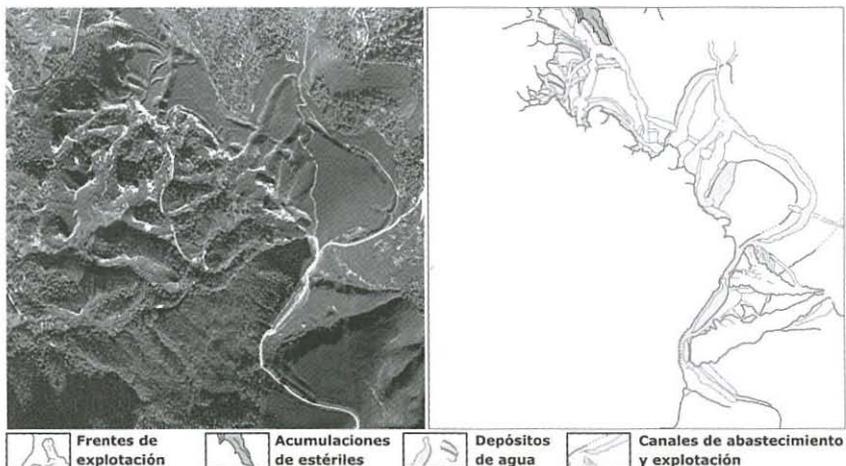


Figura 2. Las Médulas, fotografía aérea y fotointerpretación de las estructuras mineras en el frente de explotación NE del sector principal de la mina de oro.



FotIntpCSP / EST-AP / IH-CSIC



Figura 3. Ortografía y fotointerpretación del territorio de explotación del castro prerromano de El Castrelin de San Juan de Paluezas.

A través del estudio del paisaje concebido como creación cultural, el proyecto desarrollado en Las Médulas ha permitido la investigación y valoración tanto de los elementos tecnológicos relacionados con la explotación del oro [22-25] (Figura 2), como de aquellos relacionados con los asentamientos romanos y prerromanos [23, 26] (Figura 3) y con las condiciones paleoambientales y paleoeconómicas [27-30] (Figura 4) del área en la Antigüedad. La investigación, iniciada en 1988, se planteó desde sus inicios en estrecha conexión con su conservación, valoración y difusión, y está marcada por varios hitos que señalan los diversos esfuerzos dirigidos a una valoración y planificación global del área. Así, de forma contemporánea a las primeras actuaciones, se realizó ya en 1992 un estudio dirigido a la valoración del área como parque arqueológico [31], financiado por el Ministerio de Cultura y coordinado desde el Instituto de Historia del CSIC. Es entonces cuando toma forma y se pone en marcha la articulación actual de valoración de la zona -señalización de itinerarios, construcción de un aula arqueológica, acondicionamiento de accesos y yacimientos- [32] que pone de relieve los procesos de transformación de las poblaciones prerromanas y las nuevas formas romanas de ocupación del territorio. Además se publican los primeros folletos y una guía arqueológica sobre la zona [33]. Todo ello culmina en 1997 con la inclusión de Las Médulas, como paisaje cultural, en la Lista del Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO.

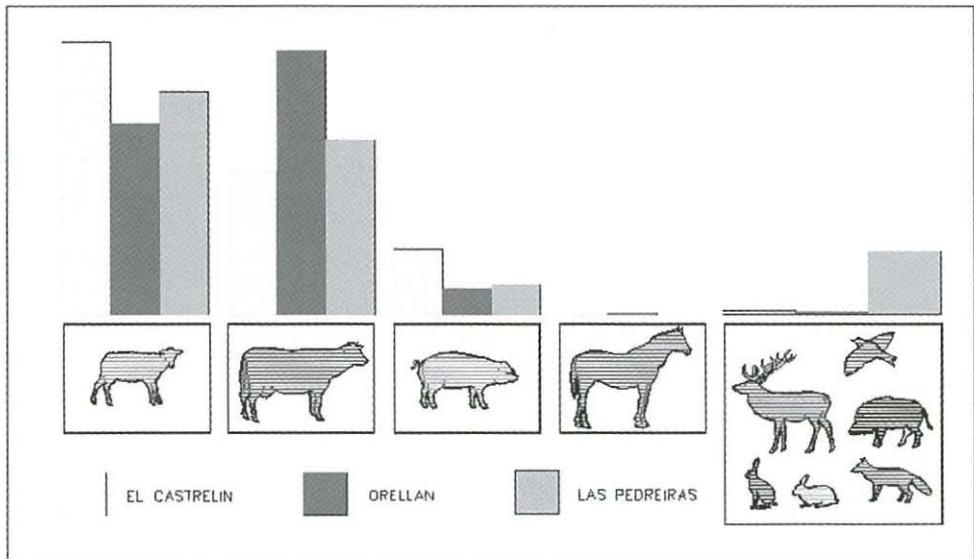


Figura 4. Las Médulas, representación de restos de ovicápridos, bóvidos, suidos, équidos y caza en basureros de los yacimientos prerromano de El Castrelin de San Juan de Paluezas y romanos de Orellán y Las Pedrerías.

Desde aquellos años el proyecto científico sobre la zona ha ido avanzando y promoviendo una parte importante de las propuestas de valoración patrimonial y explotación turística de Las Médulas. A lo largo del último semestre del año 2001 nuestro GI coordinó la realización del Plan Director de Usos y Gestión de Las Médulas (PDLM), financiado por la Junta de Castilla y León [34]. Este plan, que considera el área en conjunto como un paisaje cultural (independientemente de los instrumentos legales que se empleen para su gestión) consta de dos partes fundamentales: la primera está formada por un amplio volumen de documentación; la segunda parte la componen las propuestas relativas a la zona cuyo objetivo fundamental es conseguir un desarrollo sostenible racional a través de la protección y promoción de los diversos recursos del área (no sólo de los elementos histórico

arqueológicos del paisaje, sino también de otros como el turismo, la ganadería, los recursos forestales, etc.)



Figura 5. Entrada a la exposición “Las Médulas. Patrimonio de la Humanidad” celebrada en el Real Jardín Botánico del CSIC de Madrid.

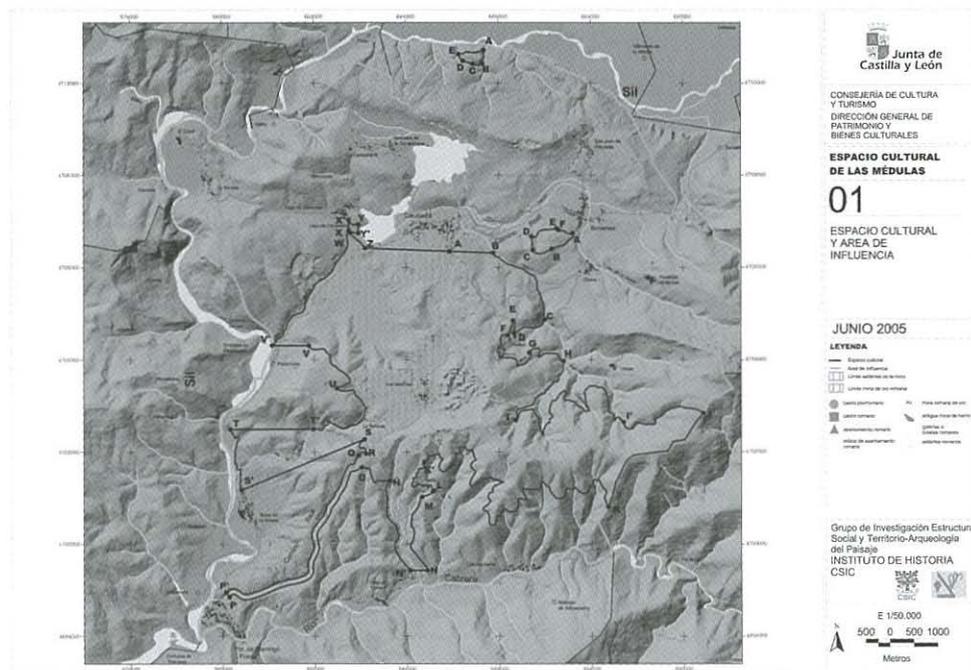


Figura 6. Delimitación del BIC y del área de influencia del paisaje cultural de Las Médulas.

La trayectoria de la ZAM en los últimos años permite considerar que la viabilidad y el éxito de la puesta en valor de los paisajes culturales como proyecto de desarrollo social, cultural y económico debe pasar por la revisión constante de una estrategia de gestión y puesta en valor del paisaje, en el que todos los elementos que lo componen forman un todo y, como tales, se encuentren integrados en una oferta global. La construcción de esta estrategia debe realizarse sobre el trabajo científico. En este sentido nuestro grupo de investigación ha asumido desde el comienzo la responsabilidad de la comunicación y puesta en valor de los resultados de la investigación y se ha implicado en la puesta en marcha y desarrollo de este proyecto. Una buena muestra de ello es la constante colaboración con la Junta de Castilla y León en labores de difusión, como la exposición "Las Médulas, Patrimonio de la Humanidad" celebrada en el Jardín Botánico de Madrid [16] (Figura 5), y en el apoyo científico a las medidas tomadas para su protección y mejora [19, 35] (Figura 6), o nuestra continua colaboración con la Fundación Las Médulas (www.fundacionlasmedulas.org).

Desde comienzos del año 2007 Las Médulas son, junto al asentamiento de Castro Ventosa (que articulaba el antiguo territorio Bergidense, en el Bierzo Occidental) uno de los objetivos del Proyecto Intramural de Frontera del CSIC "Paisajes culturales y naturales del Bierzo: Geoarqueología, Paleoambiente y Paleobiología (BierzoRojoVerdeNegro)" (BierzoRVN). Este proyecto plantea la ejecución de un plan de investigación del patrimonio cultural y natural sobre el que se sostenga una red territorial de recursos en El Bierzo para su uso comunitario y turístico. De esta forma nuestro GI coordina, desde el Centro de Ciencias Humanas y Sociales del CSIC, la actuación de siete GI pertenecientes a diversos centros del CSIC. En la actualidad se está trabajando en una doble línea: por una parte, en la adquisición de un registro paleoambiental lo más completo posible para el estudio de la evolución de los paisajes antiguos de la región; por otra parte, y en relación con el estudio del asentamiento de Castro Ventosa y su territorio, se han desarrollado una serie de actuaciones (levantamiento microtopográfico de todo el asentamiento, prospección geofísica y geoquímica de la superficie del asentamiento, tomografía eléctrica del asentamiento, estudio paramental y estratigráfico de las estructuras murales que conforman el recinto de Castro Ventosa, intervenciones arqueológicas en la zona de habitación) que, además de estar dirigidas a comprender la configuración territorial antigua del área, pretenden también servir de modelo sobre la aplicación de métodos y técnicas para el análisis y documentación de los paisajes.

En este campo nuestro GI ha realizado varias aportaciones particulares, por una parte, en relación con el desarrollo de la prospección arqueológica en zonas con visibilidad reducida (así, en el yacimiento de Duratón, en Segovia; o en el área de la Sierra de la Peña de Francia) y, por otra, con la aplicación de métodos de análisis no destructivos (como la fotografía aérea, la microtopografía y la geoarqueología) para el análisis de la morfología de los paisajes antiguos [36] y, en concreto, de zonas mineras y áreas de cultivo. Especialmente significativos en este sentido han sido los proyectos vinculados a la Zona Arqueológica de Las Cavenes (ZAC) [37]. Nuestra investigación del Nordeste de lo que fue en época romana el territorio de Lusitania, ha permitido profundizar en estudios regionales sobre áreas hasta ahora muy poco estudiadas, como la Sierra de la Peña de Francia y su entorno [38] y la zona portuguesa de Penamacor y Meimoa [39]. En estas zonas, además de profundizar en el conocimiento del registro arqueológico, el estudio ha proporcionado un modelo de comparación con otras del cuadrante noroccidental, particularmente en lo referido a las formas de explotación y ocupación del territorio. Más en concreto, nuestro estudio regional del nordeste lusitano (desde finales del Bronce hasta época altoimperial) muestra un proceso histórico muy semejante al del Noroeste [18, 40, 41].

En este marco geográfico hay que resaltar los resultados obtenidos por el proyecto de estudio de la Sierra de Francia sobre la arqueología de los espacios cultivados, en particular el estudio geoarqueológico de las terrazas de cultivo de la ZAC [38, 41] (Figura 7). Su íntima relación con las zonas mineras documentadas en ella y en la zona portuguesa aporta, en

primer lugar, nuevos datos sobre las formas de ocupación del suelo provincial y sobre el carácter no sectorial de las actividades mineras. Por otra parte, se ha logrado la puesta en marcha de una metodología interdisciplinar en la que la geoarqueología tiene un peso importante [42].

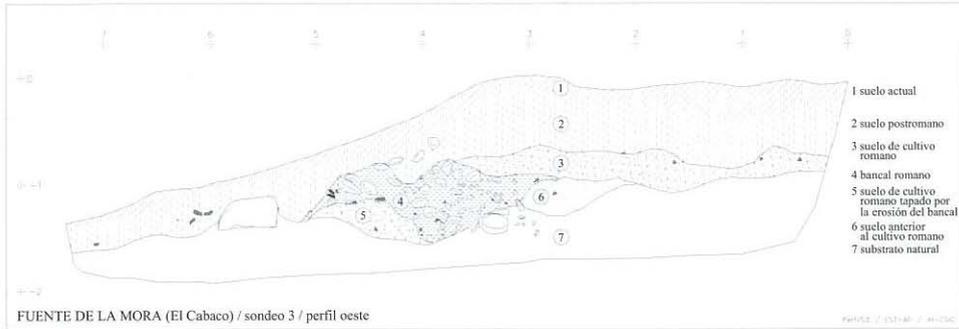


Figura 7. Las Cavenes de El Cabaco. Paleoterrazas de cultivo romanas de la Fuente de la Mora. Detalle de la identificación de suelos en el perfil oeste del sondeo 3.

Sin haber alcanzado todavía una documentación tan precisa como en la zona astur leonesa o en el nordeste lusitano, las prospecciones y fotointerpretación en los sectores seleccionados de la zona vadiniense (NE de León y Zamora) están proporcionando también las bases para una novedosa interpretación de la zona. Las estructuras mineras registradas y el estudio de los asentamientos vinculados al abundante registro epigráfico vadiniense permiten proponer un modelo territorial y una estructura social muy alejada de la visión “indigenista y ganadera” hasta ahora atribuida a esas comunidades en época romana [43].



Figura 8. Zona minera de Pino del Oro. Cazoletas para la molienda de mineral aurífero de La Sierpe-02.

Como en el caso del territorio berciano y salmantino, la combinación de las fuentes escritas y epigráficas y del registro geoarqueológico está resultando altamente positivo y constituye la base de la valoración de estos paisajes a través de la construcción de itinerarios en la zona de Pino de Oro [44]. En ella, la excelente conservación de los diferentes tipos de

estructuras mineras (Figura 8) está permitiendo tanto un completo estudio de este tipo de actividad (Figura 9), como una planificación para su explotación racional dentro del parque natural de Arribes del Duero.

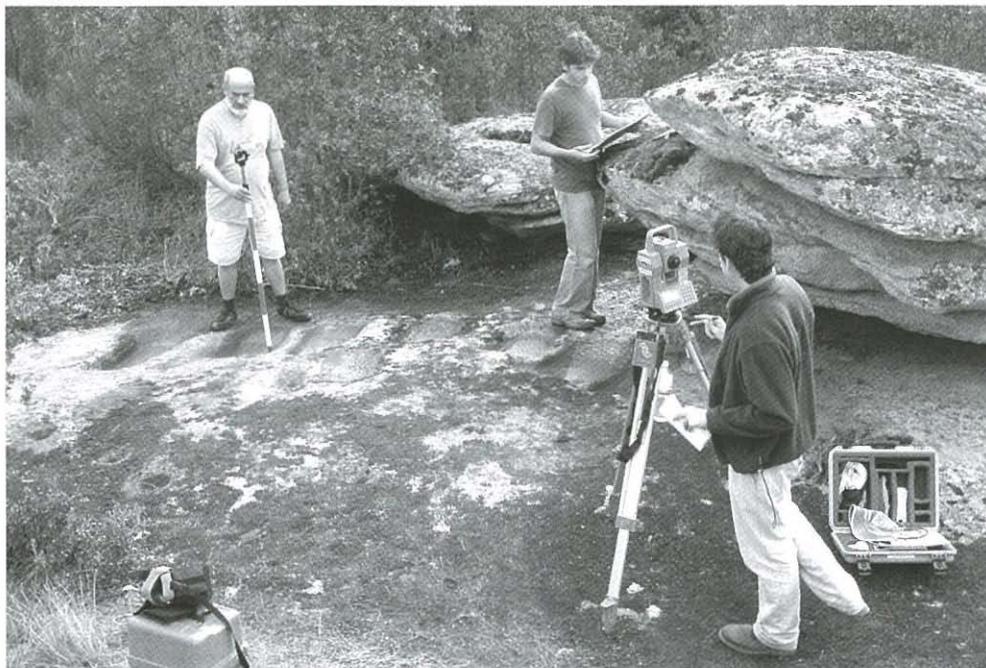


Figura 9. Zona minera de Pino del Oro. Realización de la microtopografía del conjunto de cazoletas de Los Monticos-01.

Toda esta labor se enmarca, como hemos reiterado, en la investigación de las transformaciones de los territorios del occidente de la Península Ibérica tras la conquista romana. Hasta ahora el objetivo científico central de nuestros proyectos ha sido la profundización en el conocimiento de la evolución de las comunidades rurales del cuadrante noroccidental de la Península Ibérica entre las etapas finales de la protohistoria y finales del Alto Imperio, atendiendo a la explotación de los recursos y a las relaciones sociales, insistiendo en la no sectorialidad de la actividad minera [23, 41, 43, 45, 46]. En este contexto se enmarca también el trabajo desarrollado en otras zonas del noroeste peninsular, como el que realizamos en la zona de Gijón - Oviedo (en torno a la villa romana de Veranes) [47]. Allí el estudio abarca también hasta el inicio de la Edad Media, prestando especial atención a los procesos de cambio que marcan los límites de la Antigüedad. En el caso de Veranes, el estudio convergente del registro arqueológico y de las fuentes escritas ha constituido también un pilar esencial en la aproximación histórica al poblamiento rural antiguo. La aplicación, además, de la metodología geoarqueológica empleada en las zonas ya mencionadas, nos ha permitido contar con nuevos indicadores arqueológicos que se han revelado fundamentales para el análisis de las formas de ocupación y explotación de los territorios antiguos en esta área. De nuevo aquí comprobamos que resulta imprescindible una lectura convergente de los registros materiales y escritos bajo una nueva óptica y que esta sea la que marque las propuestas de carácter patrimonial.

Bajo esta perspectiva hemos llevado a cabo también aproximaciones globales más generales en otras zonas peninsulares [48] como Cartagena [49], Sierra Morena [50], el

Suroeste Peninsular [51], siempre con el objetivo de investigar los cambios impulsados por la explotación a gran escala romana con alcance territorial, social, tecnológico.

Todo ello nos ha permitido dirigir o coordinar síntesis del estado de la cuestión en Europa en relación con los paisajes antiguos normalizados [52] y mineros [53] o respecto a las tendencias más recientes en la valoración y difusión como recurso de los paisajes culturales [7, 8, 10].

3. PERSPECTIVAS DE DESARROLLO

Los enfoques de estudio del paisaje desarrollados por el GI han producido unos resultados en relación con la comprensión de las sociedades antiguas que los sitúan en la vanguardia europea. En relación con la Edad del Hierro, se están desarrollando en Europa, principalmente en Gran Bretaña, importantes estudios que han supuesto la reinterpretación del registro arqueológico tradicional y la apertura de nuevas interpretaciones sobre las formaciones sociales en torno a la noción de "non triangular societies". Como resultado, la imagen de la Edad de Hierro europea está marcada por la diversidad, y no por una artificial homogeneidad centrada sobre todo en modelos de base filológica. Estos cambios de enfoque están favoreciendo una importante reflexión en la que no sólo está resultando de enorme interés el recurso a modelos antropológicos sino que, sobre todo, se está revalorizando el papel de la arqueología como fuente generadora de teoría social por sí misma. Un fenómeno semejante se percibe en el caso de la reflexión sobre los procesos de cambio en la dominación romana de los territorios del Occidente del Imperio. El énfasis en la ruralidad y los nuevos enfoques sobre el contacto o choque intercultural permiten conocer formas alternativas de "romanización" que, nuevamente, nos muestran una notable diversidad en un panorama que hasta ahora se había visto restringido a enfoques monolíticos y mecanicistas.

La implicación directa de esta investigación en la difusión científica a través de los paisajes culturales es un factor de primer orden en el actual proceso de cambio que el propio concepto de patrimonio está viviendo en los últimos años. La concepción objetualista está resultando cada vez más obsoleta, y el paisaje se erige como un recurso didáctico flexible, multifuncional y versátil. El paisaje cultural, como síntesis de procesos históricos, es una herramienta cada vez más fructífera en la difusión de las renovadas interpretaciones históricas. La nueva visión de las sociedades antiguas se difunde más ágilmente a través de un nuevo formato de acercamiento al público en general, en el que otros valores, como los medioambientales, también están presentes. Así mismo, paisaje y conocimiento se convierten en nueva fuente de recursos duraderos para muchas regiones.

Diversos organismos internacionales han formalizado ya en documentos bien conocidos la figura del paisaje en su dimensión cultural; baste recordar las diversas categorías de paisajes culturales definidas por la UNESCO o el Convenio Europeo del Paisaje [54]. Desde el 7º Programa Marco de Investigación, la UE dará cabida a nuevos proyectos, potencialmente tanto dentro del tema 6 (Medioambiente, Nuevas Tecnologías en Medioambiente) como del tema 8 (Ciencias Sociales y Humanidades). En otros ámbitos de la investigación europea como COST y la ESF, las secciones de Humanidades y Ciencias Sociales están igualmente pilotando iniciativas en el ámbito de los genéricamente denominados "Landscape Studies" a los que se está reconociendo un alto valor estratégico en relación, por ejemplo, con la recalificación de zonas, la resolución de desequilibrios demográficos, el desarrollo de la Europa de las regiones o la Política Agraria Común.

4. AGRADECIMIENTOS

Todas estas investigaciones se han articulado en torno a proyectos de investigación y colaboraciones con diversas instituciones tanto nacionales como internacionales. Por una parte, y desde hace más de 15 años, los proyectos de investigación financiados por el Plan Nacional han permitido que nuestro GI articule su investigación coordinadamente con otros investigadores y GI de diversas universidades y centros de investigación: Instituto de Patrimonio Histórico Español del Ministerio de Cultura, Universidad de Valladolid, Universidad de León, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Autónoma de Madrid, Universidad de Oviedo e Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología del CSIC en Salamanca.

La reciente concesión de un proyecto CONSOLIDER ("Programa de investigación en tecnologías para la conservación y revalorización del patrimonio cultural") permitirá ampliar y mejorar las colaboraciones de estos y otros GI que trabajan en cuestiones relativas al Patrimonio Histórico con un importante peso de los paisajes culturales. Los equipos que participan en este proyecto pertenecen a varios institutos del CSIC y a las universidades de Jaén, del País Vasco, de Santiago y Politécnica de Madrid.

Los proyectos de investigación desarrollados en ámbitos regionales han contado también con el apoyo financiero e institucional de las Comunidades Autónomas y Ayuntamientos implicados, a través de Proyectos de Investigación, Proyectos de Desarrollo Regional (MINER, Hábitat Minero) y Convenios de Colaboración. Así cabe mencionar a la Junta de Castilla y León y al Principado de Asturias; a los Ayuntamientos de El Cabaco, Pino de Oro, Cacabelos y Gijón; y a diversas instituciones y empresas privadas como la Fundación Las Médulas y DRG, s.a.

La proyección internacional de nuestra investigación está garantizada por la participación de nuestro GI en Acciones Integradas desde 2003 con Portugal, a través de la Universidad de Coimbra y de la Universidad do Minho, y con Italia, gracias a la colaboración con la Universidad de Perugia. Por otra parte nuestro GI ha participado activamente en la Acción COST G2 (*Paysages anciens et structures rurales. Textes et Archéologie*, 1995-2001), liderada desde la Universidad del Franco-Condado (Francia) y que integró GI de trece países europeos. Actualmente nuestro grupo lidera, como se ha citado más arriba, la Acción COST A27 (*Understanding Pre-industrial Structures in Rural and Mining Landscapes*, 2004-2008) en la que se integran 21 países europeos. Este liderazgo nos ha permitido consolidar los contactos con los GI españoles integrados en dicha Acción (CSIC, Universidad Autónoma de Barcelona, Universidad de Murcia, Universidad Autónoma de Madrid / Ayuntamiento de Gijón, Universidad de Jaén, Universidad de Sevilla). También dentro de iniciativas auspiciadas por COST somos miembros fundadores del *Cultural Heritage Interest Group* que desde el año 2002 articula la labor de diversos proyectos europeos relacionados con el patrimonio cultural. Igualmente participamos en diversos grupos de trabajo internacionales en el marco de la Comisión Europea, COST y la ESF.

5. REFERENCIAS

[1] Sánchez-Palencia, F.J. (1985): Reflexiones sobre la nueva ley del Patrimonio Histórico Español y la Arqueología. *Análisis e Investigaciones Culturales* 25: 11-19.

[2] Sánchez-Palencia, F.J., Fernández-Posse, M^ºD., Fernández Manzano, J., Orejas, A., Álvarez González, Y., López González, L.F. y Pérez García, L.C. (1996): Las zonas arqueológicas como paisajes culturales: el Parque Arqueológico de Las Médulas (León). En M^ºA. Querol y T. Chapa (eds.) *Homenaje al Profesor Manuel Fernández-Miranda* II: 383-403. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

- [3] Sánchez-Palencia, F.J., Fernández-Posse, M^aD., Fernández Manzano, J., Orejas, A., Pérez García, L.C. y Sastre, I. (2000): Las Médulas (León), un paisaje cultural Patrimonio de la Humanidad. *Trabajos de Prehistoria* 57 (2): 195-208.
- [4] Sánchez-Palencia, F.J. y Fernández-Posse, M^aD. (2001): Las Médulas (León), un paisaje cultural. En J.M. Iglesias (ed.) *Cursos sobre el Patrimonio Histórico*, 5, "Conjuntos Arqueológicos y Centros de Interpretación del Patrimonio Histórico y Natural": 299-309. Santander.
- [5] Sastre, I. y Orejas, A. (2001): Arqueología y textos. Reflexiones sobre la Historia de las sociedades antiguas en España durante la última década. En S. Castillo y R. Fernández (eds.) *Historia Social y ciencias sociales*: 11-28. Lleida.
- [6] Sánchez-Palencia, F.-J., Orejas, A. y Ruiz del Árbol, M^a (2003): Archaeological Heritage as a main sustainable resource for the development of rural areas: the experience of the Archaeological Zone of Las Médulas. En R. Kozłowski (ed.) *Cultural Heritage Research: a Pan-European Challenge*: 280-282. Kraków: European Communities.
- [7] Ruiz del Arbol, M^a y Orejas, A. (eds.) (2005): *Landscapes as cultural heritage in the European Research. Proceedings of the Open Workshop, Madrid, 29th october 2004*. Biblioteca de Ciencias 22. Madrid: Action COST A27 / CSIC.
- [8] Lévêque, L., Ruiz del Árbol, M^a, Pop, L. y Bartels, C. (2006): *Journeys through European Landscapes - Voyages dans les paysages européens*. Ponferrada : Action COST A27 / Fundación Las Médulas.
- [9] Orejas, A. y Ruiz del Árbol, M^a (2006): Habiter et exploiter le paysage: autour des mines d'or de Las Medulas. En L. Lévêque (ed.) *Paysages de mémoire, mémoire du paysage*: 211-235. Paris: L'Harmattan.
- [10] Bartels, C., Orejas, A., Ruiz del Árbol, M^a y van Londen, H. (2007): *Landmarks. Profiling Europe's Historic Landscapes*. Bochum: Deutches Bergbau Museum / Action COST A27 / CSIC.
- [11] Sánchez-Palencia y F.J., Orejas, A. (1991): Fotointerpretación arqueológica: el estudio del territorio. En A. Vila (coord.) *Arqueología*: 1-22. Madrid: CSIC.
- [12] Orejas, A. (1995): *Del "marco geográfico" a la Arqueología del Paisaje. La aportación de la fotografía aérea*. Madrid: CSIC.
- [13] Ruiz del Árbol, M^a, Sánchez-Palencia, F.-J., Orejas, A. y Pecharromán, J.L. (2005): The Application of Aerial Photography to the Conservation and Management of Cultural Parks. En J. Bourgeois y M. Meganck (eds.) *Aerial Photography and Archaeology. A Century of Information*: 289-298. Gante.
- [14] Perea Caveda, A. y Sánchez-Palencia, F.J. (1995): *Arqueología del oro astur. Orfebrería y Minería*. Oviedo: Caja de Asturias.
- [15] Orejas, A. (2002): Aspectos técnicos y organización del trabajo en la *lex metalli vipascensis*. En I. González Tascón (coord.) *Artifex. Ingeniería romana en España*: 255-272. Madrid: Museo Arqueológico Nacional.
- [16] Sánchez-Palencia, F.-J. (dir.), Fernández-Posse, M^aD., Orejas, A., Plácido, D., Ruiz del Árbol, M^a y Sastre, I. (2002): *Las Médulas. Patrimonio de la Humanidad*. Valladolid: Junta de Castilla y León.
- [17] Sánchez-Palencia, F.-J. y Sastre, I. (2002): La red hidráulica en las minas de oro romanas del Noroeste hispano: Las Médulas. En I. González Tascón (coord.) *Artifex. Ingeniería romana en España*: 241-253. Madrid: Museo Arqueológico Nacional.
- [18] Sánchez-Palencia, F.J., Ruiz del Árbol, M., López Jiménez, O. y Moreno Guerrero, E. (2003): *Tierra, agua y oro. Arqueología del Paisaje en la Sierra de Francia*. Salamanca: Museo de Salamanca.
- [19] Sánchez-Palencia, F.-J., Sastre, I. y Ruiz del Árbol, M^a (2005): *Aula Arqueológica de Las Médulas. Remodelación del montaje expositivo*. GI Estructura Social y Territorio - Arqueología del Paisaje, IH del

CSIC. Madrid - Las Médulas, 06.10.05. Informe presentado ante el Servicio de Restauración de la Dir. Gral. de Pat^o y BB. CC. de la Junta de Castilla y León.

[20] Sánchez-Palencia, F.J. y Fernández-Posse, M^oD. (1985): *La Corona y El Castro de Corporales I. (Truchas, León)*. Excavaciones Arqueológicas en España 141. Madrid: Ministerio de Cultura.

[21] Fernández-Posse, M^oD. y Sánchez-Palencia, F.J. (1988): *La Corona y El Castro de Corporales II. Campaña de 1983 en La Corona y Prospecciones en la Cabrera y la Valdería (León)*. Excavaciones Arqueológicas en España 153. Madrid: Ministerio de Cultura.

[22] Pérez García, L.C., Sánchez-Palencia, F.J. y Torres Ruiz, J. (2000): Tertiary and Quaternary alluvial gold deposits of Northwest Spain and Roman mining (NW of Duero and Bierzo Basins). *Journal of Geochemical Exploration* 71: 225-240.

[23] Sánchez-Palencia, F.J. (ed.), Fernández-Posse, M^oD., Fernández Manzano, J., Olmos, R., Orejas, A., Pérez García, L.C., Plácido, D., Ruiz del Árbol, M^o y Sastre, I.; con la colaboración de: Moreno, E., Álvarez, Y., López, L.F. y Báez Mezquita, J.M. (2000): *Las Médulas (León). Un paisaje cultural en la Asturia Augustana*. León: Instituto Leonés de Cultura.

[24] Sánchez-Palencia, F.-J., Pérez García, L.C. y Orejas, A. (2000): Geomorphology and Archaeology in the Las Médulas Archaeological Zone (ZAM) (León, Spain). Evaluation of wastes and gold production. En F. Vermeulen y M. De Dapper (eds.) *Geoarcheology of Landscapes of Classical Antiquity*: 167-177. Leiden.

[25] Sastre, I. y Sánchez-Palencia, F.-J. (2002): La red hidráulica de las minas de oro hispanas: aspectos jurídicos, administrativos y políticos. *Archivo Español de Arqueología* 75: 215-233.

[26] Sánchez-Palencia, F.J. y Orejas, A. (1994): La Minería de oro del noroeste peninsular. Tecnología, organización y poblamiento. En D. Vaquerizo Gil (coord.) *Minería y Metalurgia en la España prerromana y romana*: 147-223. Córdoba: Diputación Provincial de Córdoba.

[27] Galván, V., Fernández-Posse, M^oD., Sánchez-Palencia, F.J. y Galván, J. (1993): Tipos cerámicos y geoquímica: El Castrelín de San Juan de Paluezas (León). *Archivo Español de Arqueología* 66: 248-257.

[28] Fernández-Posse, M^oD., Montero, I., Sánchez-Palencia, F.J. y Rovira, S. (1993): Espacio y metalurgia en la Cultura Castreña: la Zona Arqueológica de Las Médulas. *Trabajos de Prehistoria* 50: 197-220.

[29] Sánchez-Palencia, F.J., Orejas, A. y Sastre, I. (2006): Roman gold mines: legal and territorial practices. En F. Reduzzi (ed.) *Sfruttamento, tutela e valorizzazione del territorio: dal diritto romano alla regolamentazione europea e internazionale*: 181-193. Napoles: Jovene Editore.

[30] Sánchez-Palencia, F.-J. y García, A. (2007): Geomorphological changes and the possible use of mercury in the Roman gold mines of Northwestern Hispania En *From local to global: scales and implications of Historic Mining. Workshop on Mining Landscapes*. Aberystwyth: University of Wales (en prensa).

[31] Sánchez-Palencia, F.J., Fernández-Posse, M^oD. y Fernández Manzano, J. (dir.) (1992): *La Zona Arqueológica de Las Médulas. Estudio de viabilidad para su conversión en Parque Arqueológico*. ICRBC del Ministerio de Cultura. Madrid, junio de 1992. (documento científico-técnico restringido e inédito).

[32] Sánchez-Palencia, F.J., Fernández-Posse, M^oD., Fernández Manzano, J. y Báez Mezquita, J.M. (dir.) (1994): *Parque Arqueológico de Las Médulas. Anteproyecto*. Junta de Castilla y León. Dirección General de Patrimonio y Promoción Cultural. Madrid, febrero de 1994. (documento científico-técnico restringido e inédito).

[33] Sánchez-Palencia, F.J., Fernández-Posse, M^oD., Fernández Manzano, J. y Orejas, A. (1996, 1^a reimpresión: 1999): *La zona arqueológica de Las Médulas (León). Guía Arqueológica*. Valladolid: Junta de Castilla y León / Fundación Cultural Banesto.

- [34] Fernández Manzano, J. y Sánchez-Palencia, F.J. (coord.) (2001), *Plan Director de ordenación, usos y gestión de Las Médulas*. Junta de Castilla y León, Valladolid (documento científico-técnico restringido e inédito).
- [35] Sánchez-Palencia, F.-J. (dir.), Fernández-Posse, M^aD., Orejas, A., Ruiz del Árbol, M^a, Sastre, I., Pecharroman, J.L. y Moreno, E. (2005): *Documentación para la declaración del espacio cultural de Las Médulas (León)*. GI Estructura Social y Territorio - Arqueología del Paisaje, IH del CSIC. Madrid, junio de 2005. Informe presentado ante el Servicio de Protección de la Dir. Gral. de Pat^o y BB. CC. de la Junta de Castilla y León (documento científico-técnico restringido e inédito).
- [36] Orejas, A., Ruiz del Árbol, M^a y López, O. (2002): Los registros del paisaje. *Archivo Español de Arqueología* 75: 287-311.
- [37] Sánchez-Palencia, F.J. (1997): *Minería de oro romana en Lusitania: Las Cavenes de El Cabaco (Salamanca)*. Estudio histórico y arqueominero y propuestas para su explotación racional realizadas para el Ayuntamiento de El Cabaco y para Desarrollo de Recursos Geológicos, s.a. Centro de Estudios Históricos del CSIC. Madrid. Diciembre de 1997 (documento científico-técnico restringido e inédito).
- [38] Ruiz del Árbol, M^a y Sánchez-Palencia, F.J. (1999): Les "terrasses" de la Fuente de la Mora (El Cabaco, Salamanca, Espagne): l'occupation et l'organisation du territoire dans le Nord-Est de la Lusitanie. *Dialogues d'Histoire Ancienne* 25 (1): 213-221.
- [39] Sánchez-Palencia, F.-J. y Pérez, L.C. (2005): Minería romana de oro en las cuencas de los ríos Erges/Erjas y Bazágueda: la zona minera de Panamacor-Meimoa. En *Lusitanos e Romanos no Nordeste da Lusitania*: 267-307. Guarda: ARA / CEI.
- [40] Sánchez-Palencia, F.J., Ruiz del Árbol, M^a y López Jiménez, O., con la colaboración de García, A. (2002): *La Zona Arqueológica de Las Cavenes (El Cabaco, Salamanca)*. *Geoarqueología y Arqueología del Paisaje (ZAC-GAP) (Protohistoria y época romana)*. IRNASA del CSIC. Salamanca, octubre de 2002. Memoria final del proyecto presentada ante la Consejería de Educación y Cultura de la Junta de Castilla y León. (documento científico-técnico restringido e inédito).
- [41] Ruiz del Árbol, M^a (2005): *La arqueología de los espacios cultivados. Terrazas y explotación agraria romana en un área de montaña. La Sierra de Francia (Salamanca)*. Anejos de AEspA XXXVI. Madrid: CSIC.
- [42] Ruiz del Árbol, M^a, Sánchez-Palencia, F.J., López-Sáez, J.A., López, P., Macías, R. y López, O. (2003): A geoarchaeological approach to the study of Roman terraces: landscape transformations in a mining area in the north-western Iberian Peninsula. En E. Fouache (ed.) *The Mediterranean World Environment and History. Environmental Dynamics and History in Mediterranean areas*: 331-339. Paris: Elsevier.
- [43] Sastre, I. (2001): *Las formaciones sociales rurales de la Asturia romana*. Madrid: Ediciones Clásicas.
- [44] Sánchez-Palencia, F.-J., Sastre, I., Alonso, F., Currás, B., Moreno, E., Pecharromán, J.L., Reher, G.-S. y Romero, D. (2006): *Investigación y valoración como recurso de la Zona Minera de Pino del Oro (Zamora)*. *ZoMiPO 2006. Memoria Final*. GI Estructura Social y Territorio - Arqueología del Paisaje, IH del CSIC - Ayuntamiento de Pino del Oro. Madrid - Pino del Oro, octubre de 2006 (documento científico-técnico restringido e inédito presentado dentro del Programa "Hábitat Minero" de la Junta de Castilla y León).
- [45] Orejas, A. (1996): *Estructura social y territorio. El impacto romano en la Cuenca Noroccidental del Duero*. Anejos de AEspA XV. Madrid: CSIC.
- [46] Orejas, A., Plácido, D., Sánchez-Palencia, F.J. y Fernández-Posse, M^aD. (1999): Minería y Metalurgia: De la Protohistoria a la España romana. En *Estudios de economía antigua en la Península Ibérica. Nuevas aportaciones (= Studia Historica. Historia Antigua 17)*: 263-298. Salamanca: Universidad de Salamanca.

- [47] Fernández Ochoa, M^aC., Gil Sendito, F. y Orejas, A. (2004): La villa romana de Veranes. El complejo rural tardorromano y propuesta de estudio del territorio. *Archivo Español de Arqueología* 77: 197-219.
- [48] Orejas, A. y Montero, I. (2001): Colonizaciones, minería y metalurgia prerromanas en el Levante y Sur peninsulares. En B. Costa y J. H. Fernández (eds.) *De la mar y de la tierra. Producciones y productos fenicio-púnicos. XV Jornadas de Arqueología Fenicio-Púnica (Eivissa, 2000)*: 121-159. Eivissa.
- [49] Orejas, A. y Sánchez-Palencia, F.-J. (2002): Mines, Territorial Organization, and Social Structure in Roman Iberia: *Carthago Noua* and the Peninsular North-West. *American Journal of Archaeology* 106: 581-599.
- [50] Orejas, A., Cepas, A., Plácido, D., Sánchez-Palencia, F.J., Sastre, I. y Ruiz del Árbol, M^a (2004): La vallée moyenne du Guadalquivir. Paysage et territoire. En *Perception and evaluation of Cultural Landscapes*: 41-57. Atenas / Paris: Diffusion de Bocard.
- [51] Fernández-Posse, M^aD. y Sánchez-Palencia, F.J. (1996): Riotinto: la memoria antigua desde la actualidad. En *Memoria Antigua de Romanos, nuevamente descubierta en las Minas de Río-Tinto. de Francisco Thomas Sanz* (edición facsímil transcrita): 49-97. Clásicos de la Arqueología de Huelva 6. Huelva: Diputación Provincial de Huelva.
- [52] Clavel-Lévêque, M. y Orejas, A. (dir.) (2002): *Atlas historique des cadastres d'Europe. II*. Luxemburgo: European Commission, OPCE.
- [53] Orejas, A. (dir.) (2001 y 2003): *Atlas historique des zones minières d'Europe, I - II*. Luxemburgo: European Commission, OPCE.
- [54] Ruiz del Árbol, M^a (coord.) (2006): *Convenio europeo del paisaje. Florencia, 20 de octubre de 2000* (edición en castellano). Ponferrada: Fundación Las Médulas / Junta de Castilla y León.

LÁSERES EN LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL

M. Oujja Ayoubi y M. Castillejo Striano

**Instituto de Química Física Rocasolano
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano 119
28006 Madrid**

Resumen. Se presenta el grupo de investigación "Láseres en la conservación del Patrimonio Cultural" cuya actividad se orienta hacia el desarrollo y aplicación de técnicas avanzadas basadas en láser para la limpieza, análisis y diagnóstico de superficies de interés artístico. Desde sus comienzos, el grupo se ha dedicado a investigar las interacciones elementales entre la radiación láser y los materiales artísticos mediante técnicas de espectroscopía óptica y espectrometría de masas con énfasis en los procesos que tienen lugar a nivel molecular. Además se ha avanzado en el desarrollo de técnicas de espectroscopía láser no destructivas o microdestructivas para el análisis de objetos y superficies artísticas y el control de su estado de conservación. Estas investigaciones y análisis se realizan sobre sistemas modelo y en objetos reales a través de colaboraciones con restauradores e instituciones del patrimonio.

1. INTRODUCCION

Los materiales y tecnologías utilizados en los procesos artísticos y en la fabricación de objetos y estructuras de relevancia histórica reflejan los conocimientos y usos de la sociedad en la que fueron concebidos. La investigación científica en el ámbito del Patrimonio Cultural para el estudio de sus aspectos materiales y para el diseño de estrategias de conservación, se enfrenta a un sinnúmero de retos debido a la complejidad y valor intrínseco de los substratos y objetos, a su historia pasada de exposición a agentes de deterioro y al paso del tiempo. La Fotónica, que se ocupa de la generación, control, y detección de fotones (particularmente en el visible e infrarrojo cercano, pero asimismo en el ultravioleta, IR lejano y la región de los THz), junto con las técnicas basadas en haces de neutrones y radiación de sincrotrón, ofrecen soluciones innovadoras a dichos retos. En las últimas décadas el rápido desarrollo experimentado por los dispositivos y técnicas láser ha proporcionado nuevas metodologías y soluciones en la ciencia de la conservación. El amplio rango de materiales utilizados en obras de arte u objetos del Patrimonio Cultural, junto con la complejidad de procedimientos de uso, requiere el concurso de varias disciplinas dentro de la ciencia de materiales, la química y la biología para el correcto análisis y caracterización de los procesos de envejecimiento y/o deterioro.

En la actualidad los láseres se usan en conservación para limpieza, análisis de composición y diagnóstico, así como para el seguimiento de las condiciones medioambientales y su impacto en los substratos de valor histórico y cultural. La importancia de las técnicas láser para el análisis de materiales del Patrimonio radica en sus características no invasivas, su elevada flexibilidad, la posibilidad de aplicación *in situ* o remota y la ausencia de requerimiento de toma de muestra del objeto. El uso creciente de los sistemas láser en la limpieza de obras de arte y objetos del Patrimonio Cultural se sustenta en el éxito cosechado en su aplicación a diversos problemas de conservación, pero de manera más importante en los avances efectuados en la comprensión de los mecanismos operativos en la interacción del láser con los materiales y substratos tratados y en la caracterización de las consecuencias potenciales de dicha interacción. Debido a ello son imprescindibles los estudios de tipo fundamental en sistemas modelo que posibilitan la determinación de los

parámetros clave del láser y del sustrato que han de ser considerados para una correcta aplicación del láser sobre materiales de valor histórico o cultural.

La serie de Conferencias Internacionales LACONA, *Lasers in the Conservation of Artworks* ha servido de vehículo para la presentación de los avances en este campo multidisciplinar y ha impulsado la incorporación de nuevos métodos y técnicas a la práctica de la conservación. La progresión de LACONA, celebrada bianualmente desde 1995, se ha visto acompañada por el crecimiento de una industria asociada. La última edición, LACONA VII, ha sido organizada por este grupo de investigación y celebrada en el CSIC en Madrid en Septiembre de 2007.

Dentro del ámbito de los láseres en conservación, la actividad del grupo del Instituto de Química Física Rocasolano (IQFR) se extiende en tres líneas complementarias: estudios fundamentales sobre la interacción de la radiación láser con sustratos modelo; aplicación de las técnicas de limpieza láser a casos reales de conservación; desarrollo y aplicación de técnicas de espectroscopía láser para el análisis y diagnóstico de materiales y objetos del Patrimonio Cultural. A continuación se desarrollan con algún detalle dichas líneas de actividad.

2. ESTUDIOS FUNDAMENTALES SOBRE LA INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN LÁSER CON SUSTRATOS MODELO

La restauración de obras de arte con láser se basa en la eliminación de material que tiene lugar cuando se irradia un sustrato con pulsos láser de elevada intensidad. El espesor de la capa de material eliminado se sitúa entre las decenas de nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) y varios micrómetros ($1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Al aumentar la fluencia (energía por unidad de superficie), la cantidad de material eliminado generalmente aumenta. El fenómeno que da lugar a la eliminación de material se denomina ablación láser y se considera como umbral de ablación la fluencia a partir de la cual la velocidad de eliminación de material se ve incrementada bruscamente. Esta simple descripción fenomenológica esconde un número de mecanismos complejos en los que intervienen procesos de tipo térmico o fotoquímico y en ocasiones también de origen fotomecánico [1].

Para identificar los mecanismos de interacción láser-material y guiar las aplicaciones en sistemas reales se realizan estudios en sistemas modelo cuyas propiedades se encuentran bien definidas y pueden ser controladas a voluntad. En esta línea, el grupo del IQFR ha investigado sistemas consistentes en dopantes fotolábiles dispersos en polímeros, fabricados como imitación de los barnices o medios ligantes fotosensibles, en un esfuerzo para modelar la limpieza de pinturas artísticas y policromías. De este modo es posible probar la magnitud y el tipo de modificaciones químicas inducidas por la irradiación láser del sustrato y por tanto obtener información de las modificaciones potenciales que acompañan a la limpieza láser. Los estudios realizados en los sistemas modelo mencionados han abordado el efecto de los parámetros láser, longitud de onda, fluencia y duración del pulso, así como la influencia de las propiedades del sustrato, incluyendo el coeficiente de absorción, la composición química y el peso molecular. Mientras que es posible ejercer control sobre los parámetros láser, las propiedades del sustrato objeto del tratamiento escapan a dicho control. En el caso de la eliminación de barnices degradados o capas de suciedad polimerizadas sobre sustratos pictóricos, una de las propiedades que determinan el proceso de ablación láser es el peso molecular. Dicha propiedad no afecta generalmente a la reactividad de las especies radicales presentes en el sólido, sin embargo puede influir de manera decisiva sobre la eficiencia de ablación, que es generalmente mayor para moléculas con menor peso molecular. Consecuentemente para eliminar barnices más degradados o polimerizados, y por tanto con peso molecular mayor, se precisan mayores

fluencias del láser. Además en este caso la cantidad de productos no deseados, resultantes de la fragmentación de las cadenas poliméricas y que se acumulan en el sustrato irradiado, puede verse aumentada con el riesgo de alteraciones químicas para el mismo. Los estudios realizados en sistemas modelo consistentes en polímeros dopados [2-6] muestran que esta dependencia con el peso molecular no es única para los barnices, sino más bien una característica general de la ablación láser de polímeros. Hasta ahora este parámetro no había sido considerado en la práctica de la limpieza láser de obras de arte, donde el énfasis residía fundamentalmente en el uso de sistemas láser con longitudes de onda, duración de pulso y velocidades de repetición diferentes. Este tipo de investigaciones permite refinar las metodologías previas para incorporar las propiedades del material junto a los parámetros láser.

El método de limpieza láser está bien establecido como procedimiento de restauración de sustratos pétreos, fachadas arquitectónicas y esculturas y se basa en la utilización de un amplio conjunto de sistemas láser de emisión en la región espectral del infrarrojo con duración de pulso en el rango de nanosegundos ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$) o mayor. La aplicación de pulsos láser de más corta duración, en la escala de femtosegundos ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), presenta nuevas e interesantes posibilidades para abordar tratamientos de alta exigencia, como por ejemplo la limpieza de policromías o de materiales fotosensibles, como los utilizados en la pintura artística. La extrema resolución espacial del proceso de ablación, en el que se sustenta la limpieza láser, y la reducción de los efectos térmicos y fotoquímicos sobre el sustrato anticipan el éxito de la utilización de láseres de pulso ultracorto en algunas aplicaciones. Nuestro grupo realiza investigaciones sobre la limpieza láser de sustratos pictóricos, pergaminos y documentos históricos utilizando láseres de fs [7,8].

3. APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE LIMPIEZA LÁSER A CASOS REALES DE CONSERVACIÓN

Como ya se ha mencionado, la limpieza láser es un método ampliamente aceptado en la restauración de fachadas arquitectónicas y esculturas. Sin embargo su aplicación a sustratos más delicados como las pinturas y policromías, que contienen materiales sensibles a la irradiación luminosa (pigmentos, barnices, etc.), es sujeto de mayor atención y demanda una investigación cuidadosa enfocada a la identificación de las condiciones de aplicación y a los posibles efectos colaterales. Además de los estudios de carácter fundamental reseñados en el apartado anterior, el grupo del IQFR colabora con restauradores e instituciones del Patrimonio en la evaluación y aplicación de los métodos de limpieza láser sobre monumentos y obras de arte. Entre los estudios recientes se han seleccionado algunos ejemplos como son los trabajos realizados en las pinturas murales sobre mortero de la iglesia fortaleza de Santa Tecla de Cervera de la Cañada, Zaragoza (s. XV), ejemplo de arquitectura Mudéjar en Aragón, sobre los brocados aplicados en esculturas en madera de la Capilla de San Miguel, Catedral de Jaca, Huesca (s. XVI), y sobre esculturas en terracota del tímpano de la Puerta de Palos de la Catedral de Sevilla.

En el caso de las pinturas murales, éstas se encontraban cubiertas por una capa de contaminación (manchas de humedad, depósitos carbonáceos y grasos) o por repintes porosos a la ténpera. Se realizaron ensayos de limpieza en el laboratorio utilizando un láser de Nd:YAG (*Q-switched*, Quantel Brilliant B, pulso 6 ns a 10 Hz) operando a la longitud de onda fundamental a 1064 nm y en su segundo y tercer armónicos (a 532 y 355 nm respectivamente). También se experimentó en el caso de los brocados, con un láser *free running* de Nd:YAG a 1064 nm (Smart Clean, EL.EN SpA, pulso 50-120 μs) utilizando una fibra óptica para librar la radiación sobre la muestra (Figura 1) con el fin de comparar el efecto de pulsos láser de mayor duración. Estos estudios preliminares permitieron identificar los parámetros óptimos para la limpieza láser de las policromías. La mayor parte de las

superficies policromadas de la iglesia de Santa Tecla fueron finalmente restauradas utilizando el láser Nd:YAG (*Q-switched*) a 1064 nm (Figura 1a).

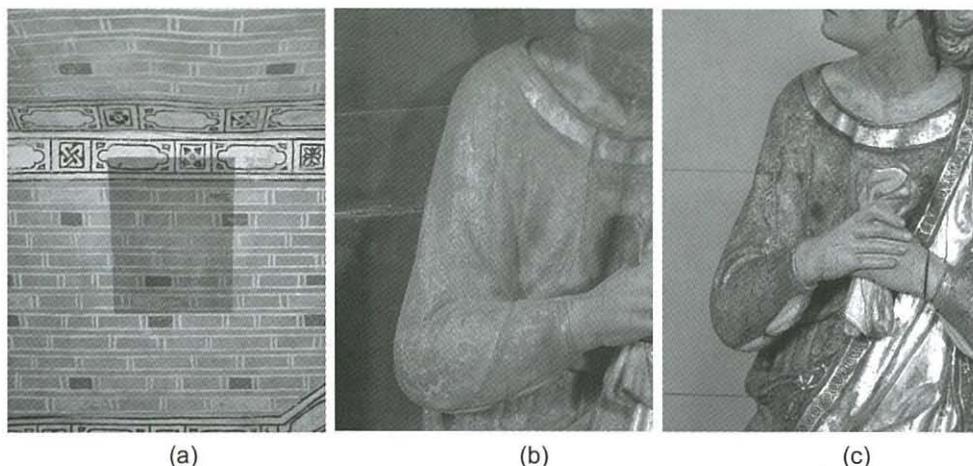


Figura 1. (a)Techo del coro de la iglesia de Santa Tecla tras la limpieza láser mostrando una zona rectangular sin limpiar; estatua de la Capilla de San Miguel decorada con brocados aplicados en relieve antes (b) y después (c) de la limpieza láser.

En el caso de los brocados de las esculturas en madera de la Capilla de San Miguel, la limpieza láser constituía el único procedimiento posible de restauración debido a que la fragilidad y porosidad del sustrato impedía la aplicación de otros métodos basados en el uso de disolventes químicos o procedimientos mecánicos. En estos sustratos, la aplicación del láser *free running* de Nd:YAG dio lugar a efectos no deseados de decoloración y pérdida de adhesión entre capas. Ello es debido a la fuerte carga térmica depositada en la irradiación láser con pulsos de larga duración en virtud de la elevada conductividad térmica de las capas metálicas de los brocados. Por el contrario la irradiación con láser de Nd:YAG (*Q-switched*) a 1064 nm produjo en los ensayos un buen efecto de limpieza (Figura 1b, 1c) y fue el método utilizado en la restauración de estos elementos artísticos [9,10].

Por último en el proceso de restauración de los motivos escultóricos en terracota del tímpano de la Puerta de Palos de la Catedral de Sevilla, se realizaron ensayos de laboratorio en una pieza con forma de mano que se encontró detrás del grupo escultórico (Figura 2a). La pieza se encontraba cubierta con una capa de suciedad en similitud con la contaminación del conjunto de esculturas del tímpano. Para estos ensayos se utilizaron las longitudes de onda de 1064, 532 y 266 nm del láser de Nd:YAG (*Q-switched*). Aunque se observó en todos los casos un efecto de limpieza, no todas las longitudes de onda demostraron la misma eficacia en la eliminación de las capas de suciedad. Se concluyó tras el estudio que la irradiación a 1064 nm resultaba más efectiva para la restauración de las decoraciones de terracota y finalmente se combinó este método con la reducción previa del espesor de la capa de suciedad con la proyección de chorro de microesferas de vidrio (Figura 2b) [10,11].

4. DESARROLLO Y APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA LÁSER PARA EL ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE MATERIALES Y OBJETOS DEL PATRIMONIO

Las espectroscopías láser de fluorescencia inducida, plasma y Raman han demostrado su utilidad y éxito en un rango amplio de aplicaciones para el análisis elemental o para la identificación de compuestos a escala micrométrica. Estas técnicas, por sí mismas o en

combinación, proporcionan datos complementarios permitiendo además el seguimiento y control *on line* del proceso de intervención durante los trabajos de conservación. Debido a su carácter no destructivo o mínimamente intrusivo, se elimina la necesidad de toma de muestra y la posibilidad de su implementación como equipos portátiles hace posible su acceso a objetos valiosos o a estructuras del patrimonio inmueble. El grupo de IQFR ha utilizado ampliamente las técnicas LIBS (*laser induced breakdown spectroscopy*), LIF (*laser induced fluorescence*) y Raman para el análisis de diversos objetos del Patrimonio, incluyendo pigmentos en pinturas y policromías, vidrios históricos, documentos en papel o pergamino, etc. A continuación se presentan los conceptos básicos de las técnicas LIBS y LIF y algunos ejemplos de aplicación.

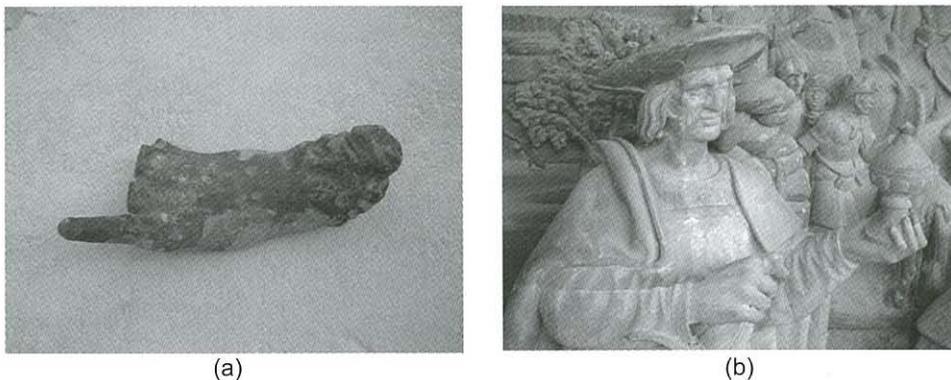


Figura 2. Mano en terracota (a) y detalle de una estatua parcialmente restaurada tras la limpieza láser del timpano de la Puerta de Palos de la Catedral de Sevilla (b).

4.1. LIBS (*Laser induced breakdown spectroscopy*)

La técnica LIBS es una técnica de espectroscopía atómica de emisión extensamente utilizada para el análisis elemental de materiales. En el esquema típico de utilización, se focaliza un haz láser intenso pulsado sobre la muestra bajo estudio, resultando en la disociación e ionización parcial del material en una pluma de plasma de rápida evolución. La detección con resolución espectral y temporal de las emisiones atómicas específicas revela información analítica de la composición elemental de la muestra. Los primeros experimentos que dan origen a esta técnica tuvieron lugar inmediatamente después de la invención del primer sistema láser. Sin embargo, sólo el desarrollo de láseres de potencia y de detectores con "puerta" temporal ha hecho posible la utilización de LIBS en un gran número de aplicaciones en control del medio ambiente, higiene industrial y diversos procesos de producción. En el campo de la conservación, la técnica LIBS es particularmente adecuada para el análisis elemental de pigmentos ya que la mayoría de los utilizados desde la antigüedad a los tiempos modernos son sustancias con contenido metálico susceptibles de ser identificados con esta técnica.

La técnica LIBS se caracteriza por su elevada sensibilidad de detección y selectividad y porque no precisa preparación de muestra, lo que hace posible la realización de análisis *in situ*. Esta técnica es mínimamente destructiva, ya que el haz láser se focaliza en una región de dimensiones micrométricas consumiéndose una cantidad muy reducida de material (de nanogramos a microgramos). Como consecuencia de la fuerte focalización del haz láser, se consigue resolución microscópica en superficie y en profundidad, lo que permite caracterizar las inhomogeneidades de la superficie de la muestra y su estratigrafía. Además, otra de las características más interesantes de LIBS es la posibilidad de su utilización durante el proceso de limpieza láser como herramienta de diagnóstico para el control *on-line* y protección contra el daño de la obra [12,13].

El sistema experimental de la técnica LIBS (Figura 3) consta principalmente de tres componentes básicos. Se precisa un láser para la ignición del plasma, un sistema de detección consistente en un espectrógrafo y una cámara CCD (*charged coupled device*) usualmente intensificada y la muestra u objeto propiamente dichos. Dependiendo de las aplicaciones en el campo de la conservación, se utilizan láseres de Nd:YAG (radiación fundamental a 1064 nm o sus armónicos a 532, 355 y 266 nm), o de excímero (ArF 193 nm, KrF 248 nm o XeCl 308 nm). Los espectrómetros habitualmente empleados poseen de 0.2 a 0.3 m de distancia focal. La red de difracción empleada (150, 1200 o 2400 líneas/mm) determina el rango espectral (entre 200 y 750 nm) y la resolución a los que se puede acceder en un único disparo del láser. Por último las cámaras CCD disponen de dispositivos de "puerta" temporal que limitan la detección a un intervalo de tiempos determinado a partir del inicio del disparo del láser. Esta posibilidad permite discriminar las señales correspondientes a las emisiones atómicas o moleculares de interés frente a un fondo espectral continuo que aparece en los primeros microsegundos, una vez iniciada la formación del plasma de ablación.

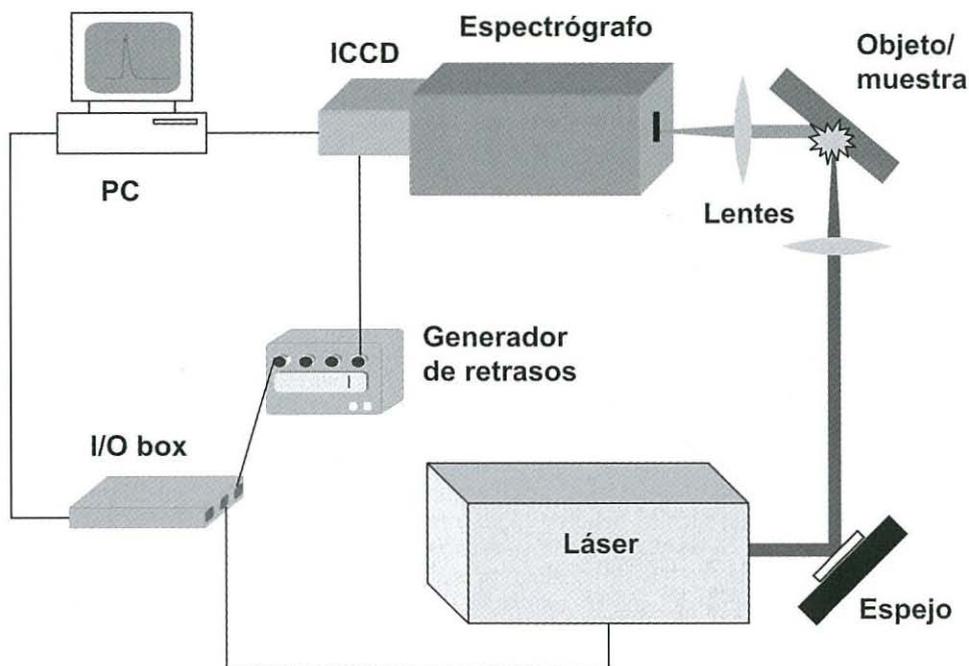


Figura 3. Diagrama esquemático del sistema experimental utilizado para medidas LIBS.

El grupo del IQFR ha utilizado la técnica LIBS en numerosos y variados substratos artísticos para caracterizar la composición elemental de materiales artísticos y en ocasiones analizar su estratigrafía. Caben destacar las aplicaciones en la identificación de pigmentos en pinturas y policromías [12-14], de cromóforos en vidrios históricos [15-17], de tintas sobre papel [18], en la caracterización de estratigrafía de película cinematográfica [19,20], etc. En ocasiones, como en el ejemplo que se reseña a continuación, la combinación con otras técnicas, como la espectroscopía Raman, ha permitido una identificación completa y fiable de los materiales utilizados en la obra artística. La Figura 4 muestra los espectros LIBS y Raman de una muestra de policromía blanca del Techo del coro de la iglesia de Santa Tecla referido

anteriormente. El espectro LIBS de una zona bien conservada de la policromía (Figura 4a) muestra la presencia de las líneas de los elementos calcio, sodio y plomo (Ca, Na y Pb). En el espectro tomado en una zona degradada y cubierta de suciedad de la muestra (Figura 4b) se observan bandas adicionales del C_2 que son indicativas de la capa de contaminación carbonácea. El espectro Raman por transformada de Fourier (FT-Raman) de la Figura 4c indica que los compuestos calcita, yeso y blanco de plomo se utilizaron en la preparación de la capa de pintura blanca y que el depósito carbonáceo es el principal componente de la capa de contaminación.

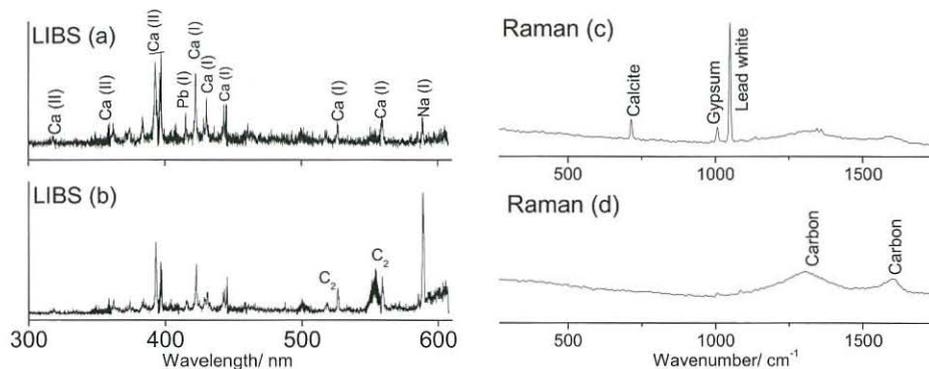


Figura 4. Espectros LIBS y Raman de un área coloreada en blanco de una muestra de policromía (Iglesia de Santa Tecla) en una zona limpia (a) y (c) y en una zona cubierta de capa de suciedad (b) y (d).

4.2. LIF (Laser induced fluorescence)

LIF es una técnica espectroscópica de emisión molecular basada en el análisis de la emisión inducida característica de cada material. Se trata de una técnica analítica no destructiva y versátil que puede ser aplicada *in situ* o en configuración remota, utilizando esquemas LIDAR (*light detection and ranging*), y que proporciona información directamente relacionada con la estructura molecular del material iluminado. Con la técnica LIF es posible la detección de especies orgánicas e inorgánicas susceptibles de emitir fluorescencia tras su excitación con luz ultravioleta (UV) o visible. Las especies responsables de la emisión de fluorescencia pueden ser especies moleculares o impurezas o defectos en las redes sólidas cristalinas. La mayoría de los materiales en estado sólido poseen bandas anchas de absorción en el UV y por lo tanto se utilizan habitualmente láseres en esta región espectral para inducir su fluorescencia. El uso del láser como fuente de excitación luminosa se asocia con la posibilidad de selección de la longitud de onda en la región espectral de absorción de un determinado fluoróforo, permitiendo la identificación del mismo con gran fiabilidad. Como ventaja adicional se pueden realizar medidas de alta resolución que permiten la identificación de sustancias químicas traza presentes en concentraciones pequeñas. Tras la excitación inicial (que ocurre muy rápidamente, en tiempos de 10^{-15} s), la emisión LIF tiene lugar en un intervalo (tiempo de vida de fluorescencia) que oscila entre algunos nanosegundos (10^{-9} segundos) y microsegundos (10^{-6} segundos). La espectroscopía de fluorescencia no siempre permite la identificación del fluoróforo de forma unívoca debido a la anchura espectral de las bandas de emisión. Sin embargo el análisis de las características temporales de dicha emisión, o la medida del tiempo de vida de fluorescencia, proporciona información adicional con fines analíticos.

Mediante el uso de la técnica LIF es posible identificar la naturaleza de barnices o medios ligantes en substratos pictóricos, de tratamientos de protección o capas de origen biológico (algas, líquenes) sobre substratos pétreos, etc. Además esta técnica se utiliza en ocasiones como diagnóstico del procedimiento de limpieza láser mediante el análisis de las modificaciones espectrales inducidas por irradiación del substrato. La recogida de un espectro LIF requiere del láser de excitación, generalmente un láser pulsado con duración de pulso de algunos nanosegundos, y de un sistema de detección con capacidad de resolución espectral y temporal. El sistema experimental típico es similar al mostrado en la Figura 3 con la salvedad de que no se focaliza el haz láser sobre la superficie de la muestra.

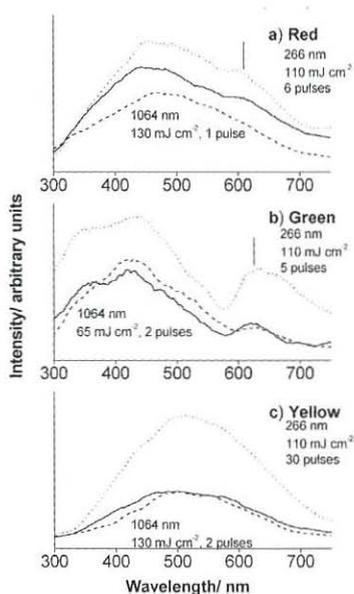


Figura 5. Espectros LIF (resolución 1 nm) de zonas coloreadas de muestras de policromías procedentes de la capilla del castillo de Mesones de Isuela, Zaragoza (s. XIV): (a) rojo, (b) verde, (c) amarillo. Las curvas continuas corresponden a zonas no tratadas mientras que las curvas discontinuas y de puntos corresponden a superficies irradiadas a 266 y 1064 nm, respectivamente. Se indican en cada caso la fluencia y número de pulsos. Las barras verticales indican las bandas de fluorescencia de los pigmentos. Tomado de [21] con permiso de Elsevier.

Entre otras aplicaciones, el grupo del IQFR ha utilizado extensamente la técnica LIF para el análisis y diagnóstico de materiales pictóricos o documentos y pergaminos [7,8,12,13]. Como ejemplo se muestran en la Figura 5 los espectros LIF de zonas coloreadas de policromías sobre madera procedentes del techo de la capilla del castillo de Mesones de Isuela, Zaragoza (s. XIV) [21]. Dichos espectros consisten en una banda ancha centrada en la región de 500 nm; los espectros de la zonas coloreadas en rojo y verde muestran una segunda banda en las regiones de 600 y 650 nm respectivamente. La banda principal proviene del medio ligante y las secundarias se asignan a los pigmentos. La irradiación de la superficie roja de la muestra con radiación láser a 266 nm, encaminada a ensayar el efecto de limpieza a esta longitud de onda, da lugar a un incremento en la intensidad de la banda del pigmento a 600 nm. Es conocido que el pigmento bermellón posee una banda de fluorescencia en esta región espectral y por ello el aumento de su intensidad se relacionó con un claro efecto de limpieza de la superficie tras la irradiación. El aumento relativo de intensidad de la banda de 650 nm, en el caso de la zona coloreada en verde, y el aumento

de la intensidad total del espectro de la zona coloreada en amarillo se explicaron asimismo en función del efecto de limpieza inducido por irradiación láser.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

El grupo del IQFR constituye un grupo de referencia a nivel europeo por su actividad enfocada a los aspectos más fundamentales de la interacción del láser con los sustratos de valor histórico artístico del patrimonio. El grupo tiene además la capacidad de realizar estudios de limpieza láser y análisis de materiales de naturaleza orgánica (pinturas y policromías, documentos y pergaminos) e inorgánica (sustratos pétreos, esculturas, vidrios y metales) como lo demuestra su participación en diferentes programas de investigación de ámbito nacional y europeo y el establecimiento de colaboraciones con empresas e instituciones del patrimonio.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo del grupo del IQFR ha sido financiado por el CSIC, por Proyectos de la Comunidad de Madrid, del Ministerio de Educación y Ciencia (CICYT, DGICT, Consolider-Ingenio), de la Unión Europea (ENV4-CT98-0787, MEST-CT2004-513915, Culture 2000, COST G7, COST D42) y por proyectos bilaterales con instituciones europeas. La actividad del grupo se ha beneficiado de la colaboración e intercambio con numerosos grupos de investigación, instituciones y empresas (Instituto del Patrimonio Histórico Español, Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural, IESL-FORTH, CORESAL, Art Innovation).

7. REFERENCIAS

- [1] Fotakis, C., Anglos, D., Zafropoulos, V., Georgiou, S. y Tornari, V. (2007): *Lasers in the Preservation of Cultural Heritage: Principles and Applications*. New York: Taylor and Francis.
- [2] Rebollar, E., Oujja, M., Bounos, G., Kolloch, A., Georgiou, S. y Castillejo, M. (2007): Analysis of plume following UV laser ablation of doped polymers: dependence on polymer molecular weight. *Journal of Applied Physics* 101: 033106-1.
- [3] Rebollar, E., Bounos, G., Oujja, M., Georgiou, S. y Castillejo, M. (2006): Effect of molecular weight on morphological modifications induced by laser ablation of doped polymers. *Journal of Physical Chemistry B* 110 (33): 16452-16458.
- [4] Rebollar, E., Bounos, G., Oujja, M., Domingo, C., Georgiou, S. y Castillejo, M. (2005): Influence of polymer molecular weight on the UV ablation of doped poly (methyl methacrylate). *Applied Surface Science* 248: 254-258.
- [5] Rebollar, E., Bounos, G., Oujja, M., Georgiou, S. y Castillejo, M. (2007): Effect of molecular weight on the physicochemical modifications induced in the UV laser ablation of doped polymers. *Journal of Physics: Conference Series* 59: 193-197.
- [6] Gaspard, S., Oujja, M., Rebollar, E., Castillejo, M., Bounos, G. y Georgiou, S. (2006): Laser removal of organic coatings: Fundamental studies and applications to Cultural Heritage. En R. Fort, M. Álvarez Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 693-698. Londres: Taylor & Francis .
- [7] Walczak, M., Oujja, M., Crespo-Arcá, L., García, A., Méndez, C., Moreno, P., Domingo, C. y Castillejo, M. (2007): Femtosecond laser pulse irradiation of ancient parchment. *Applied Physics A* (enviado).

- [8] Gaspard, S., Oujja, M., Moreno, P., Méndez, C., García, A., Domingo, C. y Castillejo, M. (2007): Interaction of femtosecond laser pulses with tempera paints. *Applied Physics A* (aceptado).
- [9] Rebollar, E., Oujja, M., Gaspard, S., Guerra-Librero, F., Castillejo, M. (2006): Cleaning and microanálisis of artworks using lasers. *Restauró* 7: 467-471.
- [10] Castillejo, M., Domingo, C., Guerra-Librero, F., Jadraque, M., Martín, M., Oujja, M., Rebollar, E. y Torres, R. (2007): From the lab. to the scaffold: Laser cleaning of polychromed architectonic elements and sculptures. En *Proceedings of LACONA VI Conference*: 116: 185-190. Berlin / Heidelberg: Springer-Verlag.
- [11] Oujja, M., Rebollar, E., Castillejo, M., Domingo, C., Cirujano, C. y Guerra-Librero, F. (2005): Laser cleaning of terracotta decorations of the portal of Palos of the Cathedral of Seville. *Journal of Cultural Heritage* 6: 321-327.
- [12] Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Silva, D., Torres, R., Domingo, C., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2001): Spectroscopic analysis of pigments and binding media of polychromes by the combination of optical laser-based and vibrational techniques. *Applied Spectroscopy* 55 (8): 992-998.
- [13] Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Silva, D., Torres, R., Zafropoulos, V., van den Brink, O.F., Heeren, R.M.A., Teule, R. y Silva, A., (2002): Analytical study of the chemical and physical changes induced by KrF laser cleaning of tempera paints. *Analytical Chemistry* 74: 4662-4671.
- [14] Kamińska, A., Sawczak, M., Oujja, M., Castillejo, M. y Śliwiński, G. (2006): Pigment identification of a XIV/XV c. wooden crucifix by means of the Raman spectroscopic technique. *Journal of Raman Spectroscopy* 37: 1125-1130.
- [15] Carmona, N., Oujja, M., Rebollar, E., Röemich, H. y Castillejo, M. (2005): Comparative study of LIBS and usual techniques applied on corroded glasses. *Spectrochimica Acta B* 60: 1155-1162.
- [16] Carmona, N., Oujja, M., Gaspard, S., García-Heras M., Villegas M.A. y Castillejo, M. (2006): Characterization of Historical and Model Lead Glasses by LIBS. En R. Fort, M. Álvarez Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 639-644. Londres: Taylor & Francis.
- [17] Carmona, N., Oujja, M., Gaspard, S., García-Heras, M., Villegas, M.A. y Castillejo, M. (2007): Lead determination in glasses by laser induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta B* 62: 94-100.
- [18] Oujja, M., Vila, A., Rebollar, E., García, J.F. y Castillejo, M. (2005): Identification of inks and structural characterisation of contemporary artistic prints by LIBS. *Spectrochimica Acta B* 60: 1140-1148.
- [19] Gaspard, S., Oujja, M., Rebollar, E., Abrusci, C., Catalina, C. y Castillejo, M. (2007): Characterization by laser induced breakdown spectroscopy of the materials of black-and-white silver-gelatin cinematographic films. *Spectrochimica Acta B* 62: 1612-1617.
- [20] Abrusci, C., Del Amo, A., Catalina F., Oujja, M., Gaspard, S. y Castillejo, M. (2006): Estudio por Espectroscopia LIBS de Gelatinas y Emulsiones Fotográficas. *Revista de Plásticos Modernos* 91 (595): 71-76.
- [21] Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Rebollar, E., Domingo, C., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2003): Effect of wavelength on the laser clearing of polychromes on wood. *Journal of Cultural Heritage* 4: 243-249.

APLICACIONES DE LA ESPECTROSCOPIA RAMAN INTENSIFICADA POR SUPERFICIES METÁLICAS NANOESTRUCTURADAS (SERS) A LA DETERMINACIÓN DE PIGMENTOS Y TINTES ORGÁNICOS DE INTERÉS EN EL PATRIMONIO CULTURAL

Z. Jurasekova, M.V. Cañamares, S. Sánchez-Cortés,
C. Domingo y J. V. García-Ramos

Instituto de Estructura de la Materia
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano 121
28006 Madrid

Resumen. Se presentan las actividades del grupo de investigación "Técnicas Espectroscópicas en la Conservación del Patrimonio" de la Red Temática del CSIC de Patrimonio Artístico y Cultural. La actividad principal del grupo en esta línea está dedicada a la puesta a punto y aplicación de la espectroscopia Raman intensificada por superficies metálicas nanoestructuradas (en inglés *Surface-enhanced Raman Scattering*, SERS) a la caracterización de tintes y pigmentos orgánicos utilizados en obras de interés para el Patrimonio Cultural. En particular, se presentan aquí los resultados de las investigaciones SERS llevadas a cabo sobre algunas moléculas de dos de las más importantes familias de colorantes orgánicos: antraquinonas y flavonoides. Además, el grupo ha aplicado las técnicas no-destructivas de espectroscopia vibracional de que dispone a la resolución de diferentes problemas relacionados con la conservación y restauración del Patrimonio, en colaboración con otros grupos de la Red Temática y de diferentes instituciones. Se revisan brevemente los resultados obtenidos en estas colaboraciones.

1. INTRODUCCIÓN

El análisis y la caracterización de materiales en las obras que forman parte del Patrimonio Cultural proporcionan información decisiva para la datación y autenticación de las mismas, así como para ayudar a determinar los cambios físicos y/o químicos que han contribuido a su deterioro, a través de la identificación de los productos de degradación de los materiales originales. Además permiten asesorar a los conservadores y restauradores sobre los posibles tratamientos a emplear y son una herramienta fundamental para los estudios de historia del arte en general. En particular vamos a referirnos aquí a la caracterización de pigmentos y tintes orgánicos que han sido utilizados desde la antigüedad y cuya identificación supone un verdadero reto. De hecho desde hace 27 años se celebra anualmente un Congreso ("*Dyes in History and Art*", DHA) en el que se reúnen historiadores, conservadores y científicos a la búsqueda de mejores métodos de caracterización de colorantes orgánicos naturales que, preferiblemente, sean no destructivos o micro destructivos y que puedan aplicarse *in situ*.

La mayoría de las técnicas analíticas que se utilizan en la identificación de pigmentos de interés en el Patrimonio son técnicas de análisis elemental (determinan los elementos químicos), con frecuencia son técnicas destructivas, y solamente algunas se pueden utilizar *in situ*. De entre las pocas técnicas físicas que permiten la caracterización molecular: difracción de rayos X, espectroscopia de absorción Vis-UV, HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) y las espectroscopías vibracionales infrarroja y Raman, estas últimas presentan numerosas ventajas. De hecho el espectro vibracional de una molécula es considerado su "huella dactilar". En particular, la espectroscopia-microscopia Raman se viene utilizando desde comienzos de los 90 para la identificación de pigmentos minerales ya

que esta técnica es no destructiva, requiere muy poca cantidad de muestra y no necesita preparación alguna de la misma ni que la muestra sea cristalina, requisito este último indispensable para el diagnóstico por Rayos X. Además ya existen en el mercado instrumentos Raman transportables que permiten hacer el diagnóstico *in situ*.

Sin embargo la aplicación de la espectroscopía Raman al estudio e identificación de pigmentos y tintes orgánicos se ha visto impedida en muchos casos debido a que la enorme fluorescencia que presentan estos compuestos, al ser iluminados por el láser utilizado para excitar el efecto Raman, oculta los correspondientes espectros Raman. Además, la baja sensibilidad de la técnica supone una desventaja a la hora de identificar los pigmentos y tintes orgánicos en muestras reales, ya que estos se encuentran normalmente en concentraciones a nivel traza y muy dispersos. Para soslayar el problema de la fluorescencia se puede acudir a utilizar un láser de excitación en el infrarrojo próximo, como se hace en la técnica FT-Raman, pero subsiste el problema de la baja sensibilidad. Hace unos 30 años se descubrió una nueva técnica Raman denominada en inglés "*Surface-Enhanced Raman Scattering*", (SERS), o espectroscopía Raman intensificada por superficies metálicas nanoestructuradas, en la que se puso de manifiesto que la intensidad de los espectros Raman de moléculas adsorbidas o muy próximas a tales superficies puede aumentar hasta 6 órdenes de magnitud (10^6) (o más en el caso de Resonancia Raman) respecto de la intensidad de los correspondientes espectros en ausencia del metal. Además en estas condiciones la fluorescencia se atenúa de modo muy considerable, ya que no es intensificada como lo es el espectro Raman. Nos encontramos así con que, utilizando la técnica SERS, desaparecen los dos inconvenientes de la espectroscopía Raman convencional que dificultaban la aplicación de la misma a la identificación de pigmentos orgánicos.

Nuestro grupo dispone de una gran experiencia en espectroscopía vibracional, infrarroja y Raman, así como en espectroscopía SERS (y su equivalente en Infrarrojo SEIRA, "*Surface-Enhanced infrared Absorption*"). A partir de 1999 comenzamos a aplicar las técnicas convencionales de espectroscopía vibracional infrarroja y Raman a la resolución de problemas relacionados con el Patrimonio y han sido varias las colaboraciones que desde entonces hemos realizado con otros grupos de la Red Temática del CSIC y con otras Instituciones. Entre otras citaremos la caracterización de pigmentos inorgánicos y aglutinantes en obras de arte de madera policromada de diferentes épocas [1-3], y los efectos que los diferentes láseres utilizados para limpieza de maderas policromadas [4] y decoraciones sobre terracota [5] ejercen sobre los pigmentos minerales y los soportes de los mismos. Respecto a otros materiales del Patrimonio, hemos colaborado en la identificación molecular de las pátinas de los emplomados de vidrieras históricas [6] y, utilizando técnicas micro-Raman novedosas de "*mapping*" (cartografía) e imagen, hemos estudiado el deterioro de las vidrieras de la catedral de Ávila [7]. Asimismo hemos aplicado la espectroscopía Raman a investigaciones sobre cemento y su deterioro [8-10] dado el interés del mismo como material de construcción empleado en obras del Patrimonio, y hemos contribuido con datos Raman a la caracterización de los procesos de polimerización de los tratamientos con productos consolidantes e hidrofugantes de piedras naturales y artificiales [11].

Pero son nuestros trabajos en espectroscopía SERS aplicada a la identificación de pigmentos y tintes orgánicos rojos (antraquinonas) y amarillos (flavonoides) llevados a cabo durante los últimos seis años las que deben considerarse como nuestra mayor contribución a los avances recientes en la investigación sobre Patrimonio. En los siguientes apartados describiremos los resultados obtenidos.

2. EFECTO SERS: FUNDAMENTOS Y MÉTODOS DE PRODUCCIÓN DE NANOPARTÍCULAS METÁLICAS

El origen del efecto SERS está en la capacidad que tienen los sustratos metálicos nanoestructurados de soportar plasmones superficiales que presentan resonancias en la zona visible del espectro electromagnético. La excitación de estos plasmones, mediante los láseres comúnmente utilizados para obtener los espectros Raman convencionales, origina una enorme intensificación de los campos electromagnéticos incidente y dispersado en las proximidades de dichas superficies. Y como la señal Raman es proporcional a la magnitud de esos campos electromagnéticos, el espectro Raman de moléculas que se encuentren en "esas" proximidades se verá también intensificado en varios órdenes de magnitud. Este mecanismo de intensificación es el llamado *mecanismo electromagnético* [12]. Existen además otros mecanismos que contribuyen en menor medida a la intensificación SERS y que colectivamente se conocen como *mecanismo químico* [13]. Aparecen nuevas reglas de selección debidas a la orientación relativa molécula-superficie, de manera que en general se intensifican más las bandas del espectro Raman correspondientes a vibraciones moleculares que tienen una componente perpendicular a la superficie. Esta es la razón de que el espectro SERS y el Raman de una especie molecular no sean, por lo general, idénticos.

Las características de los plasmones (máximo de absorción e intensidad) dependen del metal y de la morfología (tamaño y forma) de las nanoestructuras metálicas. Los metales nanoestructurados que presentan plasmones que puedan ser excitados por los láseres visibles utilizados en espectroscopía Raman son la plata, el oro y el cobre, siendo los dos primeros los más utilizados en experimentos SERS. La morfología depende del método empleado para producir las nanoestructuras metálicas que constituyen los llamados sustratos SERS. Entre otros se utilizan los siguientes sustratos SERS: coloides metálicos, ya sea en disolución o inmovilizados; islotes metálicos producidos por evaporación del metal, por deposición con láser pulsado o mediante sucesivos ciclos redox, así como nanoestructuras metálicas producidas mediante nanolitografía [14]. Los coloides metálicos, principalmente de plata, han sido los sustratos SERS más utilizados hasta el presente. Se pueden preparar a partir de una sal del metal, bien sea por reducción química, por ablación láser, mediante fotorreducción o por radiólisis. Y la morfología, que se visualiza con SEM, así como los plasmones, que se caracterizan mediante espectroscopía de absorción Vis-UV, dependen mucho del método de preparación. También las propiedades físico-químicas de la propia superficie y de la interfase existente entre las superficies metálicas nanoestructuradas y las moléculas cuyo estudio SERS queremos realizar influyen en el espectro SERS. Así el pH del medio o la concentración de la especie molecular contribuyen a determinar la forma en que dicha especie (o alguna/s de sus formas desprotonadas) se acercan a la superficie metálica, por lo que puede variar la orientación relativa molécula-superficie. En resumen, que son muchas las variables que intervienen en un espectro SERS, a las que hay que añadir la longitud de onda del láser, ya que puede haber también efectos de resonancia Raman.

3. APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA SERS AL ESTUDIO DE PIGMENTOS Y TINTES ORGÁNICOS

En los apartados siguientes vamos a resumir los resultados obtenidos en los estudios de los espectros SERS de algunos pigmentos y tintes orgánicos. Se han obtenido espectros SERS en condiciones macro y micro, con láseres de diferentes longitudes de onda, utilizando coloides de plata en disolución e inmovilizados, variando también la concentración de pigmento y el pH de las disoluciones. Se han utilizado y caracterizado coloides metálicos preparados por reducción química con citrato e hidroxilamina [15]. Se ha puesto también a punto un método de preparación de nanoestructuras metálicas inmovilizadas basado en

fotoreducción de una disolución acuosa de nitrato de plata, utilizando el microscopio Raman con un objetivo 100X y un láser a 514 nm [16]. Las especies reductoras son las que se producen en la fotólisis del agua, que tiene lugar debido a la enorme potencia de radiación que se concentra en el volumen de disolución determinado por el láser focalizado. Las variables que determinan en este caso la morfología de las nanoestructuras metálicas son la concentración de la disolución de nitrato de plata (10^{-5} - 10^{-3} M), la potencia del láser (3.0-1.5 mW antes de focalizar) y el tiempo de irradiación (2-30 minutos). Este método de preparación es especialmente adecuado para llevar a cabo el diagnóstico SERS de pigmentos y tintes naturales en muestras reales de Patrimonio de forma microdestructiva y con una gran resolución espacial.

Todos los estudios SERS realizados se han complementado con los espectros de absorción infrarroja de los pigmentos sólidos dispersos en KBr y con cálculos teóricos de las frecuencias normales de vibración de los pigmentos en su forma neutra. Y también con los espectros de absorción en el visible de las disoluciones acuosas preparadas, de los que se pueden deducir las especies iónicas que se forman.

3.1. Antraquinonas

En la Figura 1 pueden verse las estructuras químicas de los pigmentos antraquinónicos que hemos estudiado mediante espectroscopía FT-Raman y SERS. La alizarina (AZ) es un pigmento orgánico natural usado en la elaboración de obras de arte desde el año 3000 a.C.



Figura 1. Estructura química de los colorantes antraquinónicos (alizarina y ácido carmínico) y curcuminoides (curcumina) cuyo estudio se ha abordado con espectroscopía SERS.

Se extrae de las raíces del árbol *Rubia tinctorum* y los egipcios ya lo empleaban en el tinte de telas, los romanos lo emplearon en los frescos de Pompeya, y Carlomagno promovió el cultivo de dicho árbol en Europa. Se han encontrado desde manuscritos (972, certificado de matrimonio del emperador Theophanum) hasta acuarelas (1850, J.M.W. Turner), en los que se emplea alizarina para obtener, sobre todo, el color rojo. Probablemente, las causas por las que la utilización de alizarina ha sido tan extendida sean, el intenso y brillante color que proporciona, y la lenta pérdida de coloración con el tiempo. El origen de estas propiedades está relacionado con la forma de laca con la que viene aplicado. Para obtener la laca, el pigmento se mezcla con un soporte inorgánico denominado mordiente que le da una mayor estabilidad. El mordiente contiene elementos metálicos como Cu, Cr, Fe o Al con los que la alizarina forma complejos cuya coloración depende del metal y de las condiciones de reacción. Aunque la laca se emplea pura en la elaboración de vidriados, para su uso en pintura es necesario mezclarla con un ligante y/o dispersante, como por ejemplo, aceite, goma o clara de huevo, materiales que podrían ser la causa de las variaciones de color que han llegado hasta nuestros días y que es necesario caracterizar simultáneamente con el colorante. Es muy fluorescente y prácticamente insoluble en agua, pero estos "inconvenientes" no son realmente tales para su estudio mediante espectroscopía SERS.

Como ilustración, en la Figura 2 se presentan espectros Raman de alizarina en polvo y en disolución acuosa alcalina, y espectros SERS de alizarina utilizando coloides metálicos

preparados por reducción con hidroxilamina, a concentración fija y tres valores de pH, y en todos los casos con excitación a 1064 nm. Del estudio detallado y asignación de las bandas de los espectros [17] se deduce que no es la forma neutra N de la alizarina la que se adsorbe sobre la superficie de plata, sino especies aniónicas (monoaniónica A a pH ácido, dianiónica B a pH básico y mezcla a pH intermedio), y que el comportamiento en la superficie metálica es distinto del observado en la disolución acuosa. Obsérvese en la parte derecha de la figura que la forma A origina una deslocalización electrónica en el anillo muy similar a la de la especie AZ²⁻ que es la que se forma en disolución acuosa alcalina.

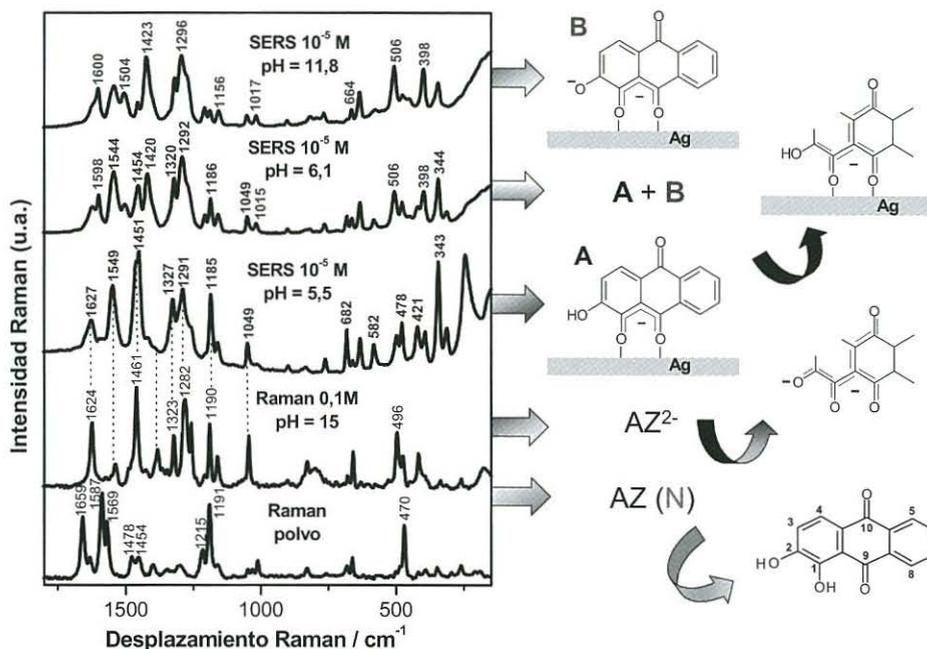


Figura 2. Espectros Raman y SERS de alizarina excitados a 1064 nm, en las condiciones indicadas, así como las diferentes especies moleculares que dan lugar a los mismos. Coloides de plata: hidroxilamina.

En la Figura 3 se ilustra el efecto sobre los espectros SERS de alizarina del cambio de concentración, a excitación láser fija a 514 nm, así como de cambio de longitud de onda del láser, manteniendo fija la concentración. En todos los casos se mantiene el pH fijo a 6,1. Los resultados indican que las bandas correspondientes a la especie A se intensifican por efecto de resonancia electrónica cuando el espectro es excitado con láser de mayor energía (514 nm), y que es la especie B la que primero se adsorbe, ya que es su espectro SERS el que se observa a muy bajas concentraciones de alizarina. Parece que la forma neutra se aproxima a la superficie cuando esta ya se encuentra recubierta con las especies aniónicas, es decir cuando se aumenta bastante la concentración.

También hemos estudiado los espectros SERS y de absorción visible de la alizarina con albúmina de huevo [18]. Es este uno de los medios en que puede dispersarse para ser empleada como pigmento en obras pictóricas. Es interesante caracterizar el complejo que se forma y las especies de alizarina que interactúan con la superficie metálica. Se concluye que la interacción es débil y que tiene lugar a través de la forma neutra N de la alizarina. En el espectro SERS se observa una disminución de la misma relativa a las especies aniónicas, que se corresponde con que sea "secuestrada" del medio por la albúmina. Pese a que la

interacción es débil, se manifiesta un cambio en el espectro de absorción y este es un efecto importante desde el punto de vista artístico, porque quiere decir que cambia el color respecto de la situación en que solamente hay alizarina.

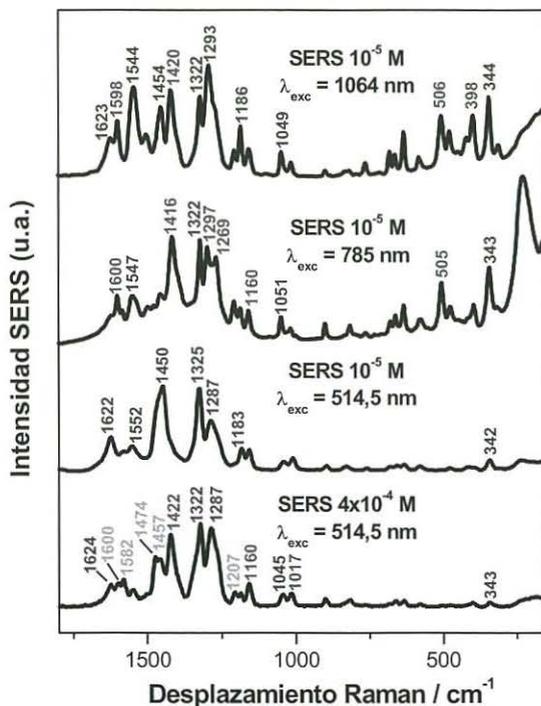


Figura 3. Espectros SERS de alizarina excitados a varias longitudes de onda y a las concentraciones indicadas. Coloides de plata: hidroxilamina.

El ácido carmínico (AC) (Figura 1) es el agente colorante del carmín que se extrae del cuerpo desecado de la hembra de la cochinilla (*Dactylopius coccus*), un insecto que vive en las hojas de algunos cactus. Este pigmento es de origen americano y se sabe de su utilización en Méjico y Perú antes de la llegada de Colón. El primer envío de cochinilla a Europa se produjo en 1523, y durante varios siglos la cochinilla fue, junto con el oro y la plata, uno de los materiales más valiosos exportados de América. Su utilidad era la de colorante textil.

De los estudios SERS llevados a cabo siguiendo un protocolo análogo al aplicado para la caracterización de la alizarina, es decir, variando tipo de coloides metálicos, concentración, pH y utilizando láseres de distintas longitudes de onda, se deduce que la interacción del ácido carmínico con la superficie de plata es más débil que en el caso de la alizarina. En los espectros de absorción de AC en agua, se encuentran las formas mono-, di- y triiónicas del AC, según el valor de pH. De los espectros SERS se infiere que a pH ácido el AC interacciona con la superficie metálica a través de los grupos *ceto* e *hidroxi* en posiciones 5 y 10 de la especie monoaniónica. La segunda ionización parece ocurrir en posición 5, produciéndose cambios muy claros en los espectros hasta pH 7. Para mayores pH se produce la tercera ionización en las posiciones 6 u 8. También se pueden explicar las diferencias observadas en los espectros SERS dependiendo de que los coloides sean de citrato o de hidroxilamina, en función de los contraiones presentes en el medio resultantes

del proceso de reducción y que modifican las propiedades químico físicas de las superficies. Además, no se observa que ninguna de las especies iónicas muestre resonancia electrónica a las longitudes de onda de los láseres utilizados [19].

Paralelamente a los estudios SERS de alizarina y ácido carmínico, hemos estudiado otra alternativa para la eliminación de la fluorescencia, de manera que pueda emplearse la espectroscopía Raman convencional para la identificación de pigmentos fluorescentes. Se trata de emplear una matriz polimérica - Zr-Ormosil (*Organic Modified Silicates*) con zirconio en nuestro caso - con una gran afinidad química por las moléculas de los pigmentos orgánicos, lo que da lugar a que estos se incorporen a dicha matriz. Además hemos encontrado que, dado que es mucho mayor la afinidad de la alizarina que la del ácido carmínico por el Zr, este método permite separar selectivamente AZ de AC en una mezcla de ambos, puesto que la primera se incorpora a la matriz mediante la formación de un complejo de la AZ con el Ormosil a través de la interacción con el Zr. Precisamente la identificación de pigmentos orgánicos con estructuras bastante similares en una muestra con mezcla de ellos es uno de los problemas de más difícil solución en el campo de la arqueometría. El estudio de los espectros Raman del complejo y su comparación con los espectros SERS de la alizarina a diferentes pH, permiten concluir que es la forma monoaniónica A de la alizarina la que participa en el complejo AZ-Zr-Ormosil [20].

3.2. Curcumina

La curcumina (CU) es un colorante natural procedente de la cúrcuma, especia obtenida del rizoma de la planta del mismo nombre cultivada principalmente en la India y utilizada desde la antigüedad para diversas aplicaciones, entre ellas como pigmento. Su estructura puede verse en la Figura 1.

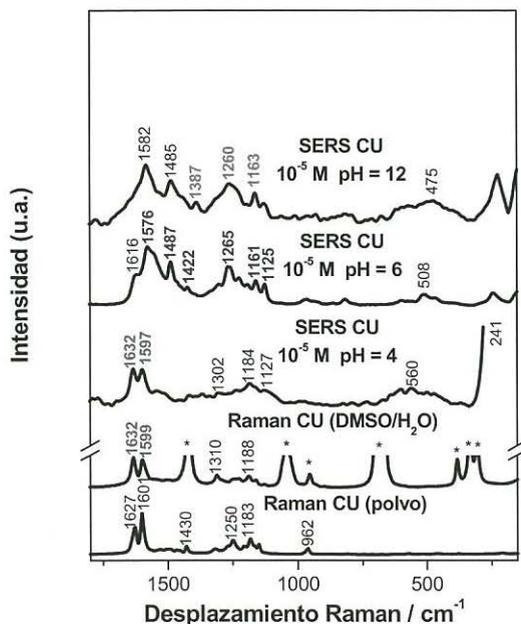


Figura 4. Espectros Raman y SERS de la curcumina en las condiciones indicadas. *: bandas del disolvente DMSO.

El mismo protocolo seguido para la caracterización de alizarina y ácido carmínico, se ha aplicado también para el estudio de la curcumina [21]. Se ha podido así seguir su proceso

de degradación, puesto que se han identificado los espectros Raman y SERS de los correspondientes productos de su degradación. La Figura 4 muestra algunos de los espectros obtenidos. La curcumina se descompone en disolución acuosa al aumentar el pH y la degradación se intensifica en presencia de superficies metálicas nanoestructuradas que catalizan el proceso. Se distinguen dos etapas en la degradación. Mientras que en el espectro SERS a pH 4 aún se reconoce la estructura de bandas a 1600 cm^{-1} que corresponde a las vibraciones de los enlaces C=C de la molécula, a pH 6 se observan bandas asignables a nuevas especies fenólicas más pequeñas y ricas en grupos carboxilato que resultan de la ruptura de la cadena interanillos. En la siguiente etapa, a pH aún mayores, se aprecia la aparición de productos resultado de la polimerización de los anteriores. También se ha estudiado la fotodegradación de la curcumina a 458 nm.

Es muy interesante que seamos capaces de detectar mediante SERS productos de degradación de los pigmentos orgánicos, puesto que la detección de pigmentos lábiles como la curcumina o algunos flavonoides en muestras reales, es prácticamente imposible si la muestra ha estado expuesta a condiciones en las que los pigmentos se han degradado, lo cual es más que probable. En este caso es la detección de productos de degradación la que nos proporciona información sobre los pigmentos originales.

3.3. Flavonoides

Los flavonoides son polifenoles naturales de origen vegetal cuyo esqueleto carbonoso está formado por dos anillos bencénicos, A y B, unidos por una cadena lineal de tres carbonos, como puede verse en la Figura 5. Se subdividen en categorías o familias (flavonoles, flavonas, flavanonas, etc.) Nosotros hemos estudiado mediante SERS los que se muestran en la Figura 5. Además de su interés como tintes orgánicos naturales, son muy estimados en el campo de la medicina y la salud por sus propiedades antioxidantes.

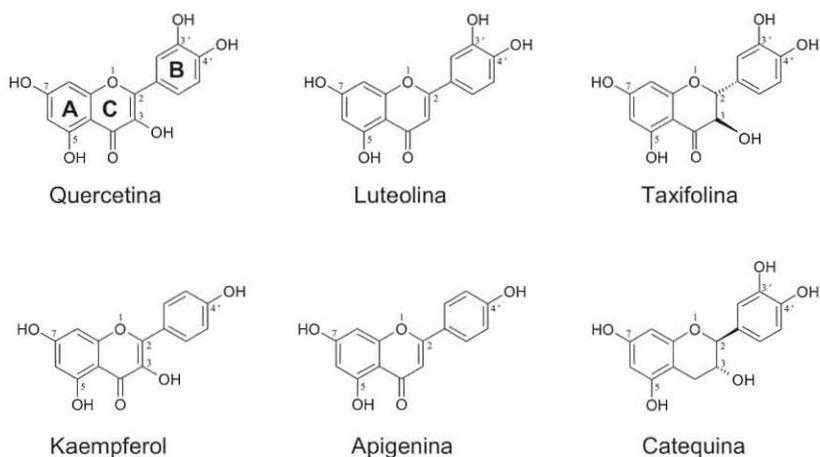


Figura 5. Estructuras de los flavonoides estudiados por espectroscopía SERS. Quercetina y kaempferol pertenecen a la familia de los flavonoles, luteolina y apigenina a la de las flavonas, la taxifolina es una flavanona y la catequina es un flavan-3-ol.

Los espectros de absorción Visible-UV de estas moléculas en disolución acuosa presentan dos bandas características: la banda I (300-385 nm) correspondiente al anillo B y la banda II (240-285 nm) correspondiente al anillo A. El perfil espectral de absorción de los flavonoides individuales depende del número y posición de los grupos OH, de modo que se pueden identificar, con bastante precisión, las diferentes familias.

Se ha seguido el mismo protocolo de estudio que para los otros pigmentos orgánicos [22, 23]. En la Figura 6 se muestran los espectros Raman (a) y SERS utilizando coloides de citrato (b), excitados a 1064 nm. Los espectros Raman en la zona por debajo de 1000 cm^{-1} corresponden a las vibraciones de esqueleto, de ahí que en esa zona se distingan precisamente la taxifolina y, sobre todo, la catequina del resto, dada su diferente estructura básica (falta de doble enlace entre los C2 y C3 y en la catequina, además, ausencia del grupo C4=O). Los espectros Raman de los flavonoides estudiados presentan las mayores diferencias en la zona $1000\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$, que corresponde precisamente a las vibraciones δ (O-H) y ν (C-O). Los espectros SERS difieren mucho de los espectros Raman de los sólidos, lo que pone de manifiesto que los flavonoides sufren cambios en su estructura cuando se adsorben sobre la plata nanoestructurada. El estudio y la asignación de los espectros nos permite identificar dos partes más lábiles en la estructura de los flavonoides: la parte del anillo B con dos grupos OH en posición orto y que es similar al catecol, y el anillo C, especialmente en los casos en que hay un grupo OH en posición α con respecto al grupo *keto*. La apigenina no tiene ninguna de estas dos partes más lábiles y es por ello que su degradación sobre las superficies metálicas es menor. El proceso de degradación de los flavonoides que se deduce de sus espectros SERS sobre plata y que incluye una fase de polimerización de los productos primarios de la degradación es similar al previamente observado en nuestro grupo, con la misma técnica SERS, para otros polifenoles, como el catecol o el ácido gálico [24-26]. Los productos de degradación aquí determinados concuerdan con los que parecen haberse identificado en la foto-oxidación de los flavonoides.

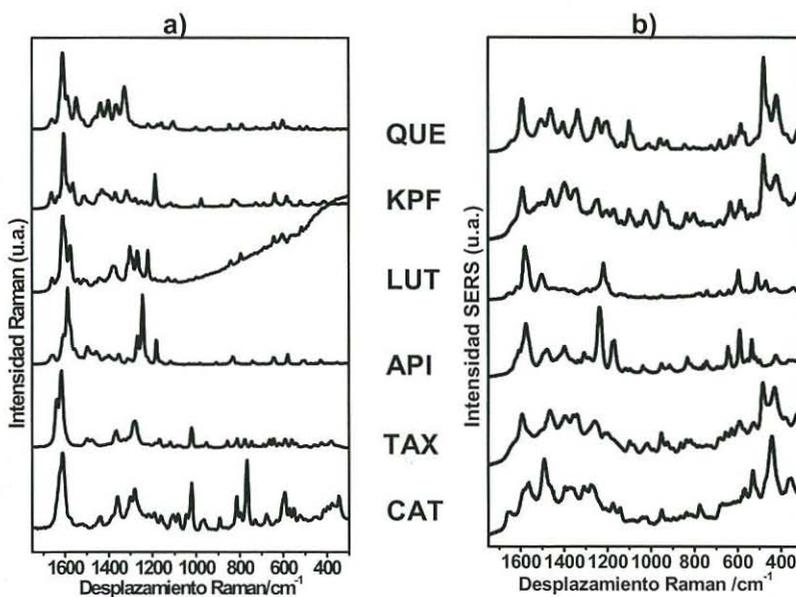


Figura 6. a) Espectros Raman de los flavonoides sólidos. Láser a 1064 nm. b) Espectros SERS 10^{-6}M de los mismos flavonoides, sobre coloides de plata por reducción con citrato. Láser a 785 nm.

En la Figura 7 se presentan los espectros SERS de uno de los flavonoides más "fugitivos" (la quercetina) y uno de los más "permanentes" (la luteolina), excitados con distintos láseres. Los cambios observados se deben a que, al igual que ocurría en el caso de la alizarina con los espectros de sus formas aniónicas, aquí son los espectros de los diferentes productos de degradación los que se ven selectivamente intensificados por resonancia electrónica.

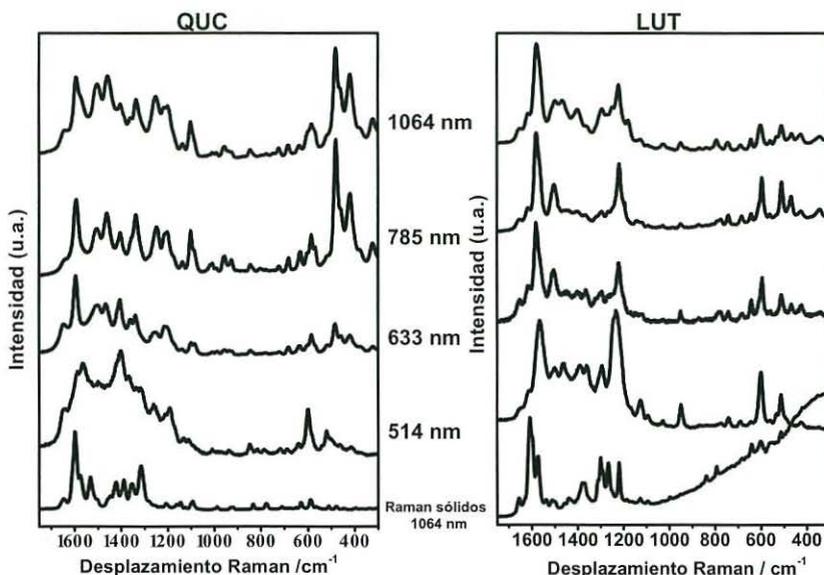


Figura 7. Espectros SERS de quercetina (QUC) y luteolina (LUT) sobre coloides de plata, excitados con láseres a 1064, 785, 633 y 514 nm. Comparación con espectros Raman de los sólidos excitados a 1064 nm.

Del estudio comparativo de todos los espectros SERS de los flavonoides en las distintas condiciones de concentración, pH, etc. que se emplea, esperamos poder establecer en breve un protocolo de identificación SERS de flavonoides que, en el menor número de pasos, permita la identificación de los mismos.

4. APLICACIÓN A MUESTRAS REALES

Dado el gran interés existente en la identificación de pigmentos orgánicos en muestras de Patrimonio, hemos sido llamados por los responsables del proyecto europeo EU-Artech (<http://www.eu-artech.org>) para participar, con nuestra técnica SERS, en el estudio comparado de las posibilidades de distintas técnicas experimentales en este campo. Para ello hemos trabajado sobre muestras patrón consistentes en: 1) pigmentos preparados según recetas originales de los siglos XII-XVIII y 2) fibras de seda y algodón teñidas con algunos de esos colorantes utilizando mordientes diferentes.

Para ilustrar el trabajo realizado, en la Figura 8 pueden verse los resultados obtenidos por nosotros para una fibra teñida con gualda. Cabe decir aquí que el pigmento mayoritario de la gualda es la luteolina. En el espectro Raman de la fibra teñida, a), solamente se ve la seda. Cuando, obtenemos el espectro SERS, b) de la misma muestra formando sobre la fibra de seda teñida nanoestructuras de plata siguiendo el método de fotoreducción en una disolución de nitrato de plata 10^{-3} M puesto a punto por nosotros [16] y descrito en el apartado 3, lo que se ve es la luteolina, como lo demuestra el que el espectro b) concuerda con los c) y d), que corresponden a espectros SERS de luteolina pura, obtenidos en las condiciones que se mencionan en el pie de figura. La conclusión es que la técnica SERS, utilizando nuestro método de producción de nanopartículas de plata sobre la muestra, permite la *extracción de la información* sobre el pigmento, sin que interfiera el soporte (la seda en este caso) y sin que sea necesario llevar a cabo una *extracción química* del

pigmento, proceso que es el que se viene utilizando en otros casos para después aplicar, por ejemplo, HPLC para la identificación del pigmento.

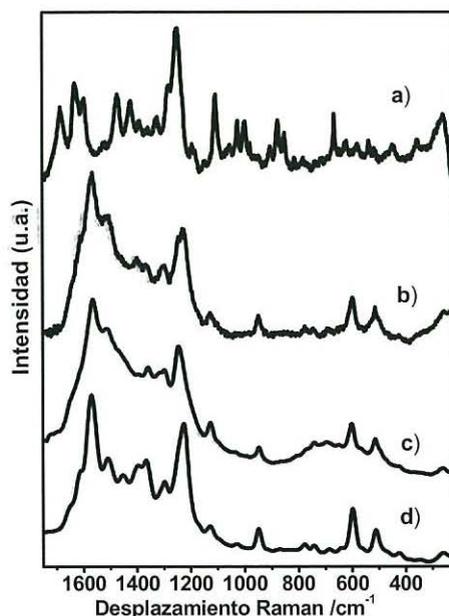


Figura 8. a) Espectro Raman a 785 nm de una fibra de seda teñida con gualda. b) Espectro SERS de la misma fibra tras haber depositado nanopartículas de plata formadas por fotoreducción. c) Espectro SERS de luteolina 10^{-5} M utilizando nanopartículas de plata como en b). d) espectro SERS de luteolina 10^{-5} M sobre coloides de plata de citrato a pH neutro. En a), b) y c) se ha utilizado un láser a 514 nm.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Nuestro grupo es considerado como pionero en la aplicación de la espectroscopía SERS a la identificación de pigmentos y tintes orgánicos. Los recientes éxitos obtenidos en la identificación de algunos de ellos en muestras reales (fibras textiles teñidas) utilizando métodos puestos a punto en nuestro laboratorio, nos llevan a confiar plenamente en las posibilidades de la técnica, debiendo establecerse protocolos de identificación en base a los completos estudios, semejantes a los descritos, que han de llevarse a cabo en el laboratorio de investigación.

6. AGRADECIMIENTOS

Los trabajos aquí descritos han sido parcialmente financiados por el Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto FIS2004-00108) y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC (PIF2005 - MADIARP). Agradecemos también el apoyo recibido de la Red Temática de Patrimonio Histórico y Cultural (CSIC). Z.J. agradece a la CE la "Marie Curie Early Stage Research Training Fellowship" concedida en el 6º Programa Marco (Contrato MEST-CT-2004-513915).

7. REFERENCIAS

- [1] Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Silva, D., Torres, R., Domingo, C., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2001): Spectroscopic analysis of pigments and binding media of polychromes by the combination of optical laser-based and vibrational techniques. *Applied Spectroscopy* 55: 992-998.
- [2] Aguiló, M.P., Cañamares, M.V., García-Ramos, J.V. y Domingo, C. (2004): Datación y caracterización de arquetas de madera decoradas: aplicación de la espectroscopía Raman a la determinación de pigmentos y soportes. En *Técnicas para la Caracterización del Patrimonio. Libro de Resúmenes de la 5ª Reunión de la Red Temática del CSIC de Patrimonio Histórico y Cultural*: 36. Madrid: CSIC.
- [3] Kaminska, A., Sawczak, M., Oujja, M., Domingo, C., Castillejo, M. y Sliwinski, G. (2006): Pigment identification of a XIV/XV c. wooden crucifix by means of the Raman spectroscopic technique. *Journal of Raman Spectroscopy* 37: 1125-1130.
- [4] Castillejo, M., Martín, M., Oujja, M., Rebollar, E., Domingo, C., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2003): Effect of wavelength on the laser cleaning of polychromes on wood. *Journal of Cultural Heritage* 4: 243-249.
- [5] Oujja, M., Rebollar, E., Castillejo, M., Domingo, C., Cirujano, C. y Guerra-Librero, F. (2005): Laser cleaning of terracotta decorations of the portal of Palos of the Cathedral of Seville. *Journal of Cultural Heritage* 6: 321-327.
- [6] García-Heras, M., Villegas, M.A., Caen, J.M.A., Domingo, C. y García-Ramos, J.V. (2006): Patination of historical stained windows lead comes from different european locations. *Microchemical Journal* 83: 81-90.
- [7] Murcia-Mascarós, S., Domingo, C., Muñoz Ruiz, A., Sánchez Cortés, S. y García-Ramos, J.V. (2006): Mapping and confocal micro-Raman spectroscopy: non-invasive analysis of weathered stained glass windows. En *34th International Symposium of Archaeometry*: 525-530. Zaragoza: Institución Fernando el Católico.
- [8] Martínez-Ramírez, S., Sanchez-Cortes, S., Garcia-Ramos, J.V., Domingo, C., Fortes, C. y Blanco-Varela, M.T. (2003): Micro-Raman spectroscopy applied to depth profiles of carbonates formed in lime mortar. *Cement and Concrete Research* 33: 2063-2068.
- [9] Martínez-Ramírez, S., García-Ramos, J.V., Sanchez-Cortes, S., Domingo, C., Blanco-Varela, M.T. y Blasco, T. (2006): Evolution of OPC hydration with admixtures by spectroscopic techniques. *Advances in Cement Research* 18: 111-118.
- [10] Martínez-Ramírez, S., Frías, M. y Domingo, C. (2006): Micro-Raman spectroscopy in white Portland cement hydration: long term study at room temperature. *Journal of Raman Spectroscopy* 37: 555-561.
- [11] Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Varas, M.J., Gómez-Heras, M., Domingo, C., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2003): Control and monitoring of the polymerization evolution and structural modifications of surface conservation treatments applied to limestones. En *First International Meeting on Applied Physics (APHYS-2003)*: comunicación 7b-9. Badajoz.
- [12] Moskovits, M. (2005): Surface-enhanced Raman spectroscopy: a brief retrospective. *Journal of Raman Spectroscopy* 36: 485-496.
- [13] Otto, A., Mrozek, I., Grabhorn, H. y Akemann, W. (1992): Surface-enhanced Raman-Scattering. *Journal of Physics-Condensed Matter* 4: 1143-1212.
- [14] Aroca, R. (2006). *Surface-enhanced Vibrational Spectroscopy*. Chichester: John Wiley & Sons.
- [15] Cañamares, M.V., Sanchez-Cortes, S., Gómez-Varga, J.D., Domingo, C. y Garcia-Ramos, J.V. (2005): Comparative study of the morphology, aggregation, adherence in glass and SERS activity of silver nanoparticles prepared by chemical reduction of Ag⁺ using citrate and hydroxylamine. *Langmuir* 21: 8546-8553.

- [16] Cañamares, M.V., Garcia-Ramos, J.V., Gómez-Varga, J.D., Domingo, C. y Sánchez-Cortés, S. (2007): Ag nanoparticles prepared by laser photoreduction as substrates for in situ Surface-enhanced Raman Scattering analysis of dyes. *Langmuir* 23: 5210-5215.
- [17] Cañamares, M.V., Garcia-Ramos, J.V., Domingo, C. y Sanchez-Cortes, S. (2004): Surface-enhanced Raman scattering study of adsorption of the anthraquinone pigment alizarin on Ag nanoparticles. *Journal of Raman Spectroscopy* 35: 921-927.
- [18] Cañamares, M.V., Sevilla, P., Sanchez-Cortes, S. y Garcia-Ramos J.V. (2006): Surface-Enhanced Raman Scattering study of the interaction of red dye alizarin with ovalbumin. *Biopolymers* 82: 405-409.
- [19] Cañamares, M.V., García-Ramos, J.V., Domingo, C. y Sánchez-Cortés, S. (2006): Surface-enhanced Raman Scattering study of the anthraquinone red pigment Carminic Acid. *Vibrational Spectroscopy* 40: 161-167.
- [20] Murcia-Mascarós, S., Domingo, C., Sanchez-Cortes, S., Cañamares, M.V. y Garcia-Ramos, J.V. (2005): Spectroscopic identification of alizarin in a mixture of organic red dyes by incorporation in Zr-ORMOSIL. *Journal of Raman Spectroscopy* 36: 420-426.
- [21] Cañamares, M.V., García-Ramos, J.V. y Sánchez-Cortés, S. (2006): Degradation of curcumin dye in aqueous solution and on Ag nanoparticles studied by UV-visible absorption and SERS spectroscopy. *Applied Spectroscopy* 60: 1386-1391.
- [22] Jurasekova, Z., Garcia-Ramos, J.V., Domingo, C. y Sanchez-Cortes, S. (2006): Surface-enhanced Raman Scattering of flavonoids. *Journal of Raman Spectroscopy* 37: 1239-1241.
- [23] Jurasekova, Z., Domingo, C., Garcia-Ramos, J.V. y Sanchez-Cortes, S. (2007): Vibrational spectroscopy as an analytical tool in the identification and characterization of natural dyes employed in the Cultural Heritage. *Coalition* 14: 14-20.
- [24] Sánchez-Cortés, S. y García-Ramos, J.V. (2000): Adsorption and chemical modification of phenols on a silver surface. *Journal of Colloid and Interface Science* 231: 98-106.
- [25] Sánchez-Cortés, S., Francioso, O., García-Ramos, J.V., Ciavatta, C. y Gessa, C. (2001): Catechol polymerization in the presence of silver surface. *Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects* 176: 177-184.
- [26] Alvarez-Ros, M.C., Sánchez-Cortés, S., Francioso, O. y García-Ramos, J.V., (2001): Catalytic modification of gallic acid on a silver surface studied by surface-enhanced Raman spectroscopy *Journal of Raman Spectroscopy* 32: 143-145.

DIAGNÓSTICO DE PROCESOS DE BIODETERIORO POR COMBINACIÓN DE MICROSCOPIA *IN SITU* Y TÉCNICAS DE BIOLOGÍA MOLECULAR

A. de los Ríos, B. Cámara, J. Wierzchos y C. Ascaso

**Instituto de Recursos Naturales, Centro de Ciencias Medioambientales
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Serrano, 115 dpdo. 28006 Madrid**

Resumen. La colonización biológica induce en la piedra además de daños estéticos, una serie de procesos de alteración mecánica y química que generan biodeterioro del monumento. El grupo de investigación de Ecología Microbiana y Geomicrobiología del Sustrato Lítico, del Instituto de Recursos Naturales del CSIC, cuenta con una estrategia de actuación para llevar a cabo el diagnóstico de los fenómenos del biodeterioro de piedra monumental en la que por combinación de técnicas de microscopía *in situ* y de biología molecular, es posible analizar los procesos de alteración producidos, los microorganismos implicados, y con ello, plantear y posteriormente evaluar tratamientos encaminados a eliminar o reducir los fenómenos de biodeterioro.

1. INTRODUCCIÓN A LA ACTIVIDAD DEL GRUPO

La piedra, ya desde que es extraída de la cantera, entra en contacto con diferentes y variados agentes físicos, químicos y biológicos que comienzan a actuar sobre ella. La combinación de todos estos factores hace que la piedra que forma parte del monumento se convierta en el hábitat de distintos microorganismos (bacterias heterótrofas, cianobacterias, algas y hongos), líquenes, musgos y plantas vasculares, los cuales inducen en ella no sólo cambios en la estética del monumento, sino también un conjunto de procesos de alteración mecánica y química más profundos. El conjunto de todos estos procesos de alteración del monumento, generados por la presencia y actividad biológica, es a lo que denominamos biodeterioro, y su contribución al deterioro del monumento tiene que ser tenida en cuenta para poder proteger y conservar nuestro Patrimonio Artístico y Cultural.

Es posible y frecuente detectar a simple vista la presencia en los monumentos pétreos de líquenes diversos (asociación simbiótica de hongos con microorganismos fotosintetizadores, algas y/o cianobacterias) y de películas coloreadas que pueden integrar cianobacterias y algas verdes de vida libre. Sin embargo, la colonización biológica no es solamente la que es visible al ojo humano, sino que habitualmente existen también microorganismos como bacterias heterótrofas y hongos de vida libre que necesitan para su detección, una observación por microscopía, así como distintos microorganismos que se localizan en posiciones internas y que no pueden ser visualizados sin técnicas especiales que permitan analizar el interior de las rocas. La zona del sustrato inerte donde coexisten líquenes y microorganismos, y tienen lugar los procesos de biodeterioro del material pétreo, es una fase organomineral compleja que puede ser considerada como un biofilm. Este biofilm está compuesto básicamente por microorganismos, componentes orgánicos originados por los microorganismos, biomarcadores y minerales.

Dada la complejidad de los biofilms asociados a los fenómenos de biodeterioro y a la necesidad de estudiarlos de forma integrada, en nuestro grupo de investigación de Ecología Microbiana y Geomicrobiología del Sustrato Lítico del Instituto de Recursos Naturales, CSIC, consideramos imprescindible su análisis mediante el uso de distintas técnicas de microscopía las cuales permiten el estudio de forma conjunta de los microorganismos y la piedra, tanto en su superficie (colonización epilítica) como en zonas internas de la piedra

(colonización endolítica). Nosotros llevamos a cabo este tipo de estudios del biodeterioro aplicando estrategias de investigación *in situ* como la microscopía de barrido en modo de electrones retrodispersados (SEM-BSE), la microscopía de barrido a bajas temperaturas (LTSEM), la microscopía láser confocal (CSLM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM). Con estas técnicas se puede estudiar la zona alterada, sin extraer los organismos del material pétreo. Con el análisis *in situ* no se alteran los microhábitats durante el proceso de estudio, lo que facilita la comprensión del papel desempeñado por los diferentes microorganismos en los procesos de biodeterioro. Cada una de las técnicas antes citadas aporta un tipo de información, las cuales en muchos casos son complementarias. Las imágenes de microscopía de barrido nos dan una idea directa y precisa de lo que está ocurriendo en cuanto a la alteración mineral producida por los microorganismos, a la existencia de minerales neoformados, y a los posibles procesos de biomovilización y biomineralización (SEM-BSE). También se puede abordar con SEM la localización del agua y el estudio de las substancias poliméricas extracelulares (LTSEM). La CSLM, nos permite estudiar la distribución espacial de los microorganismos en el sustrato y también su estado de vitalidad. Por último, TEM nos posibilita estudiar la ultraestructura de los microorganismos en detalle y en ciertos casos, la estructura de los minerales alterados, transformados o neoformados. Por otro lado, para determinar la biodiversidad existente en la piedra, y especialmente para la identificación precisa de los microorganismos implicados concretamente en los procesos de biodeterioro, se ha trabajado en los últimos años en el desarrollo de métodos diagnósticos en los cuales los análisis por microscopía *in situ* han sido combinados con estudios por biología molecular. Ambos grupos de estudios se integran formando una estrategia común encaminada al diagnóstico de los procesos de biodeterioro y al posterior diseño de los tratamientos más adecuados para reducir o eliminar los fenómenos de biodeterioro del monumento pétreo. Estos tratamientos deben ser diseñados según las características propias de los microorganismos implicados y las características particulares del monumento y su enclave. La eficacia de los tratamientos elegidos puede a su vez ser estimada también mediante esta combinación de técnicas, lo que permitirá aplicar posteriormente a todo el monumento aquellos tratamientos más indicados para el control o la eliminación de la colonización microbiana, sin daño para la piedra, y bajo las condiciones ambientales propias del monumento.

2. PROCEDIMIENTO PARA DIAGNOSTICAR PROCESOS DE BIODETERIORO

El procedimiento a seguir por nuestro Grupo de Investigación para llevar a cabo un diagnóstico de los procesos de biodeterioro por combinación de estrategias de microscopía *in situ* y técnicas de biología molecular, incluye las siguientes etapas:

2.1. Identificación de los organismos y/o microorganismos involucrados

Para encontrar soluciones a los problemas que nos crean los seres vivos en la piedra monumental, es fundamental conocer a lo que nos estamos enfrentando. Por ello, en primer lugar, es importante determinar qué organismos y/o microorganismos están colonizando la piedra monumental. Por un lado, se puede hacer un inventario de líquenes, musgos y plantas vasculares que se observen colonizando la piedra monumental (Figura 1) pero, como ya se ha comentado arriba, es necesario analizar también los otros componentes no observables a simple vista y que colonizan la superficie y el interior de la piedra.

En el estudio de los biofilms implicados en los procesos de biodeterioro, ha sido fundamental el desarrollo de la técnica denominada en nuestro laboratorio "técnica SEM-BSE", puesta a punto por Wierzychos y Ascaso [1]. Su desarrollo surgió de la necesidad de estudiar, de forma conjunta y con buena resolución, toda la fase organomineral. Esta técnica permite observaciones en un área de varios centímetros de forma similar a la microscopía óptica, pero permite resoluciones que se aproximan a las de microscopía electrónica de transmisión [2, 3]. La técnica consiste básicamente en el estudio por microscopía de barrido en modo de

electrones retrodispersados (BSE) de muestras de roca conteniendo microbiota lítica y/o líquenes, que son fijadas y deshidratadas (de modo similar a como se hace para TEM), incluidas en resina y pulidas para trabajar en BSE. Está técnica puede combinarse también con TEM para ayudar en la identificación de los microorganismos. Sin embargo, esta microscopía no puede ser aplicada directamente a las muestras pétreas recogidas de un monumento ya que se necesitan secciones ultrafinas de 90 nm que se obtienen con dificultad en este tipo de material. Para su aplicación, se extraen pequeños fragmentos de líquenes y/o microorganismos de la superficie del sustrato o del interior de fisuras y cavidades y se procesan para TEM.



Figura 1. Piedra monumental de la Iglesia de San Justo y Pastor (Segovia) con signos de biodeterioro y una colonización visible por líquenes.

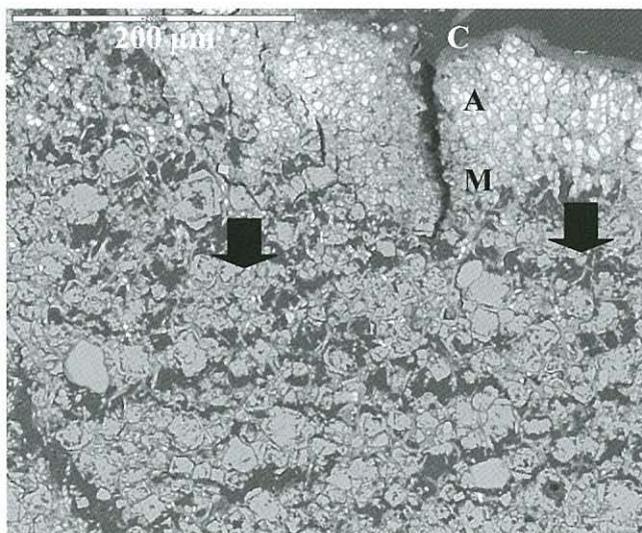


Figura 2. Imagen de SEM-BSE de un talo líquénico crustáceo estrechamente asociado a la dolomía sobre la que se asienta donde se observan las distintas capas del talo, C (cortex), CA (capa algal) y M (médula).

La combinación de todas estas técnicas ha demostrado que la piedra monumental se encuentra colonizada por grupos de microorganismos muy diversos. Los hongos, tanto de vida libre como formando asociaciones líquénicas, son los microorganismos más frecuentemente observados en asociación a fenómenos de biodeterioro [4-7]. Los hongos tienen ventajas ecológicas frente a bacterias y algas debido a su mayor tolerancia a bajos potenciales hídricos y también por sus efectivas estrategias reproductivas y de propagación, y su habilidad de crecer y propagarse en ambientes con pocos nutrientes. Los líquenes pueden ser considerados como colonizadores primarios de muchos monumentos y agentes muy agresivos con la piedra monumental. La Figura 2 es una imagen obtenida con la técnica SEM-BSE que muestra un talo líquénico creciendo sobre una dolomía, en que se pueden distinguir las distintas capas de este talo heterómero donde las células de ambos simbiontes se distribuyen. Esta técnica permite ver la interfase entre el líquen y el sustrato sobre el que se asienta, y así detectar cómo las células del micobionte penetran en el interior del sustrato lítico (Figura 2: flechas). La presencia de microorganismos endolíticos en piedra monumental y su función en los procesos de biodeterioro ha sido revelada solo con el desarrollo de estas técnicas nuevas de microscopía *in situ*. De hecho, las técnicas convencionales aplicadas generalmente al estudio de biodeterioro, tales como estudios microbiológicos, y microscopía óptica, aportan información sólo sobre los microorganismos pero no de la relación de la microbiota con la piedra. Además de por hongos liquenizados, la piedra monumental se encuentra también colonizada por otros hongos que pueden pertenecer a grupos taxonómicos muy diferentes. En la Figura 3 podemos observar un hongo no liquenizado de gran contenido lipídico ocupando la porosidad intercrystalina de una dolomía. TEM nos ha permitido ver características ultraestructurales de los hongos litobióticos y así caracterizar estos contenidos citoplásmicos y otros aspectos como la presencia de capas melanizadas en la pared (Figura 4).

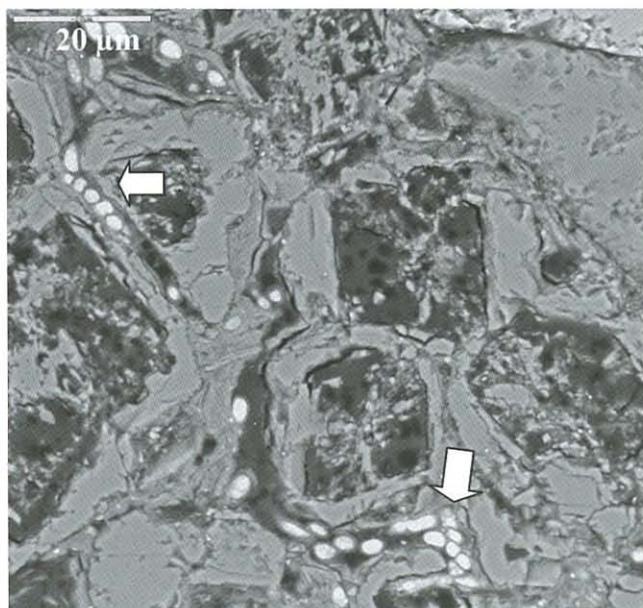


Figura 3. Imagen de SEM-BSE mostrando colonización fúngica a través de la porosidad intercrystalina de una dolomía (flechas indicando glóbulos lipídicos).

Se han observado cianobacterias y algas de vida libre en la superficie de las rocas y también dentro de fisuras y cavidades de distintos tipos de roca [8, 9]. También frecuentemente se han detectado bacterias heterótrofas, en muchos casos en estrecha asociación con otros microorganismos presentes en la zona alterada [6, 7]. Por otro lado, es muy frecuente encontrar zonas donde distintos tipos de microorganismos coexisten.

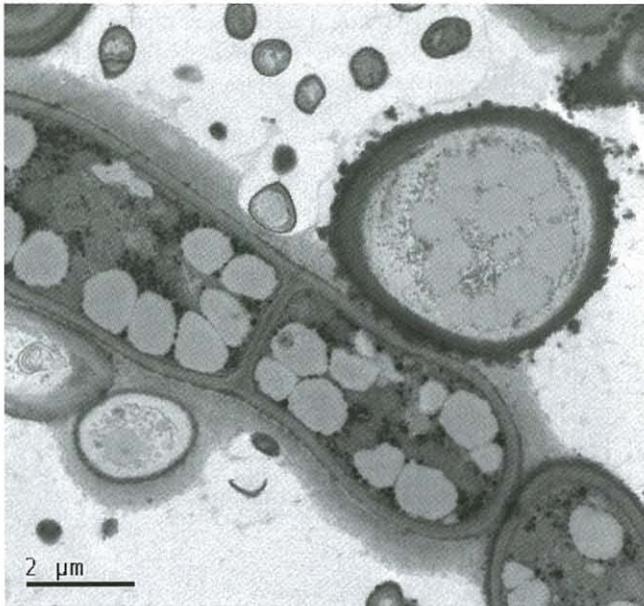


Figura 4. Imagen de TEM del hongo *Phaeococcomyces* sp. aislado de piedra monumental.

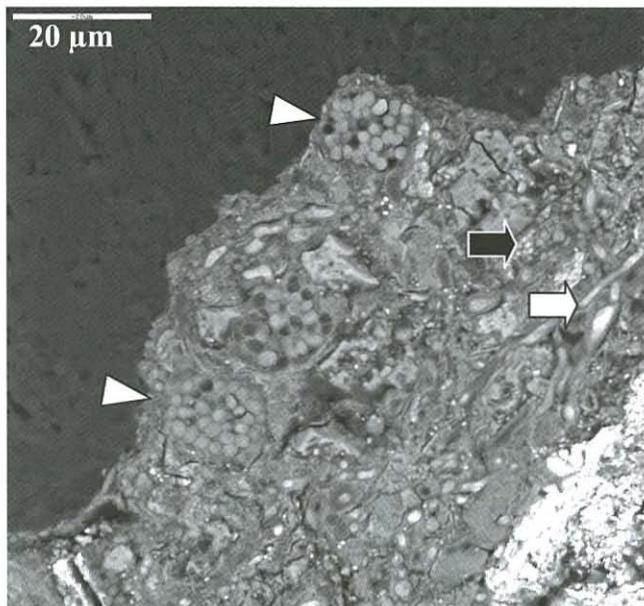


Figura 5. Imagen de SEM-BSE de un biofilm complejo presente en la piedra de la Iglesia de la Veracruz (Segovia) formado por hongos (flecha blanca), cianobacterias (puntas de flecha) y bacterias heterótrofas (flecha negra).

En la Figura 5 podemos ver un biofilm complejo donde hongos (flecha blanca), cianobacterias (cabezas de flecha) y bacterias heterótrofas (flecha negra) comparten microhábitat. También los musgos aparecen comúnmente colonizando el sustrato (Figura 6). En muchas ocasiones, se observa como su presencia favorece la existencia de microbiota en asociación [6], de la misma manera que pueden permitir la formación de suficiente sustrato para que plantas vasculares en fases posteriores puedan crecer allí.

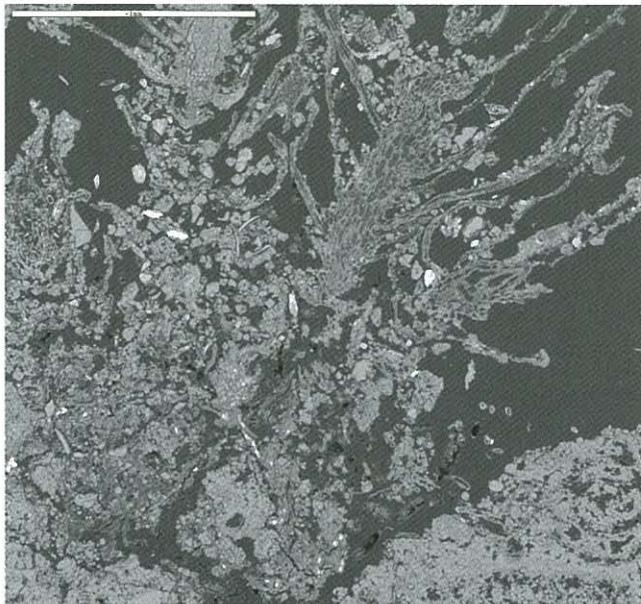


Figura 6. Imagen de SEM-BSE de la colonización por musgos de una caliza fosilífera de la Iglesia de San Millán (Segovia).

Para la identificación precisa de los microorganismos implicados en los procesos de biodeterioro se pueden utilizar las técnicas clásicas de aislamiento y cultivo, pero en la mayoría de las ocasiones hay que recurrir también a otro tipo de técnicas porque sólo algunos de estos microorganismos crecen en cultivo, o es difícil encontrar los medios específicos para hacerlo. En nuestro grupo se aplican técnicas de biología molecular para la identificación de los microorganismos implicados en los procesos de biodeterioro analizados. Se utilizan estas técnicas para identificar los microorganismos cultivados y por otro lado para determinar la biodiversidad de microorganismos presentes por electroforesis en gradiente desnaturalizante (DGGE). La técnica DGGE, especialmente cuando se combina con PCR con iniciadores específicos de distintos grupos de organismos, permite una rápida estimación de la diversidad existente en una muestra ambiental. La técnica se basa en la migración de las moléculas de DNA a través de geles que contienen concentraciones crecientes de agente desnaturalizante. El punto de desnaturalización de los fragmentos de ADN depende del tamaño y la composición de nucleótidos que lo conforman, aumentando la posibilidad de diferenciar productos diferentes. En la Figura 7 podemos ver un ejemplo de gel de DGGE donde se compara el patrón de bandas de productos de PCR con iniciadores específicos de hongos obtenidos a partir del DNA de muestras de piedra monumental con el de hongos cultivados. La posibilidad de cortar las bandas y extraer los productos de PCR presentes en las distintas bandas y llevar a cabo una reamplificación y posterior secuenciación de ellos, nos permite ir más allá e identificar a su vez los diferentes miembros de la comunidad microbiana litobiótica en distintas zonas.

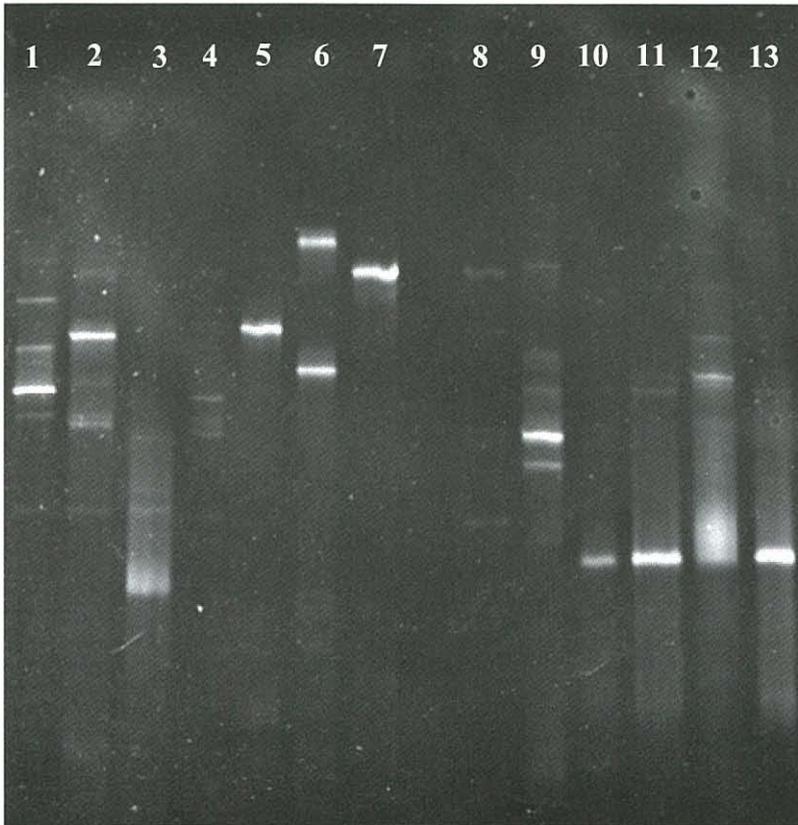


Figura 7. Gel DGGE (6% acrilamida y con un gradiente desnaturante de 30-60%) de productos de PCR amplificados con iniciadores específicos de hongos (ITS3 y ITS4GC) a partir de DNA obtenido de muestras de piedra de Redueña (Lineas 1-4, 11 y 12), de hongos cultivados a partir de este mismo material (Lineas 5-7) y de talos líquénicos epilíticos (Lineas 10 y 13).

2.2. Diagnósis de la acción alterante de líquenes y microorganismos sobre el material pétreo

Una vez determinados qué organismos y/o microorganismos colonizan la piedra monumental, hay que tratar de conocer qué alteraciones están teniendo lugar en el sustrato pétreo, y a cual de los microorganismos se deben principalmente, para poder determinar así cuales son más agresivos y planificar los tratamientos más eficaces.

Los estudios realizados hasta ahora nos han mostrado que los microorganismos de comportamiento más agresivo son los hongos, tanto en estado liquenizado, como de vida libre. Su interacción con el sustrato es muy estrecha, y forman una amplia red de colonización endolítica como puede observarse en las imágenes tridimensionales que nos aporta la microscopía láser confocal (Figura 8: flecha). La colonización fúngica y con ello el grado y tipo de alteración que producen sobre la piedra monumental se ha visto que depende de muchos factores, entre los que podemos destacar las características texturales de la roca [10]. Por ejemplo, la colonización fúngica observada en la Figura 3, parece muy condicionada a la presencia de una alta porosidad intercrystalina. También los micobiontes del talo líquénico de la Figura 2, utilizan esa porosidad para la penetración. La acción de los hongos y en general de todos los microorganismos litobióticos sobre el sustrato puede ser

de dos tipos. Por un lado, existe una acción química generada por compuestos producidos por ellos, y que generan alteración química de los minerales, y por otro una alteración mecánica, que puede provocar ruptura y desprendimiento de fragmentos minerales. Para este diagnóstico, nosotros recomendamos específicamente las técnicas de SEM-BSE (combinado con microanálisis por espectroscopía de energía dispersiva de Rayos X) y LTSEM.

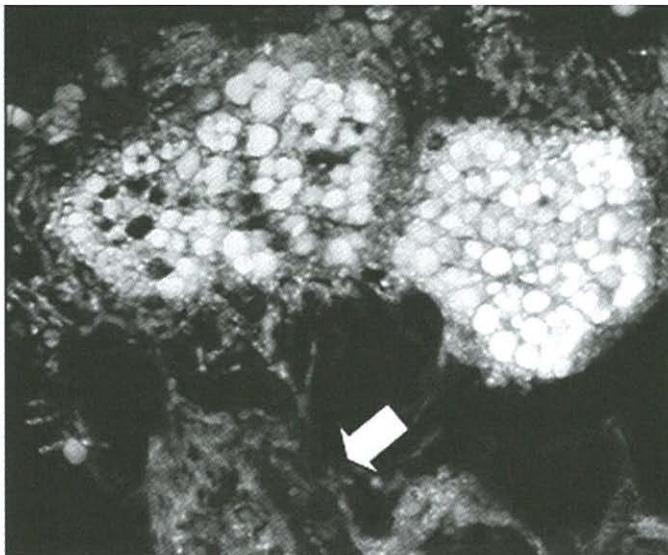


Figura 8. Imagen tridimensional obtenida por CSLM de la colonización de una dolomía por un talo líquénico mostrando la penetración del micobionte en el sustrato (flecha).

Para el estudio de la alteración de los minerales, ha sido fundamental la combinación de la microscopía de barrido con el microanálisis de espectroscopía por energía dispersiva de rayos X (EDS). Esta combinación ha permitido detectar procesos de biomineralización y de biomineralización. Los procesos de biomineralización se revelan al observar en las proximidades de los organismos litobióticos cambios en ciertos elementos químicos de los minerales del sustrato, por ejemplo, pérdida de K en micas alteradas por presencia de microorganismos [11] o el paso de biotita rica en K a biotita alterada, con una fase intermedia biotita-vermiculita [12]. En ocasiones se observan también fenómenos de biomineralización, que es la formación de nuevos minerales por la acción de microorganismos, como los depósitos de carbonato cálcico neoformado que se han observado rodeando a cianobacterias presentes en un fragmento de muro de la Torre de Belén en Lisboa [8]. En la Figura 9 podemos ver células fúngicas del líquen *Caloplaca teicholyta* que están rodeadas de un depósito de biomineral. La EDS nos indica su naturaleza rica en calcio y junto con la morfología de sus cristales y análisis por microscopía Raman, nos permite la identificación de estos depósitos como oxalato cálcico (Figura 10). La alteración química parece estar relacionada especialmente con la secreción por parte del micobionte de ácidos orgánicos quelantes (principalmente ácido oxálico como en el ejemplo anterior) y con la presencia de polímeros orgánicos extracelulares (principalmente mucopolisacáridos ácidos). Este hecho es confirmado por microscopía láser confocal, en combinación con el uso de indicadores fluorescentes de pH, que ha revelado la existencia de pH muy ácido en la proximidad de talos líquénicos crustáceos (Figura 11) y en otros biofilms endolíticos [13].

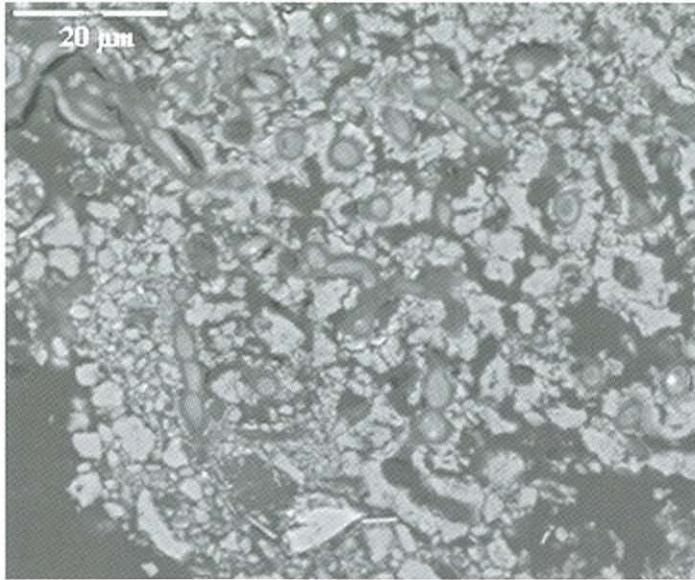


Figura 9. Imagen de SEM-BSE de hifas fúngicas del liquen *Caloplaca teichoyta* rodeadas de depósitos minerales encontradas en piedra de la Iglesia de San Martín (Segovia).

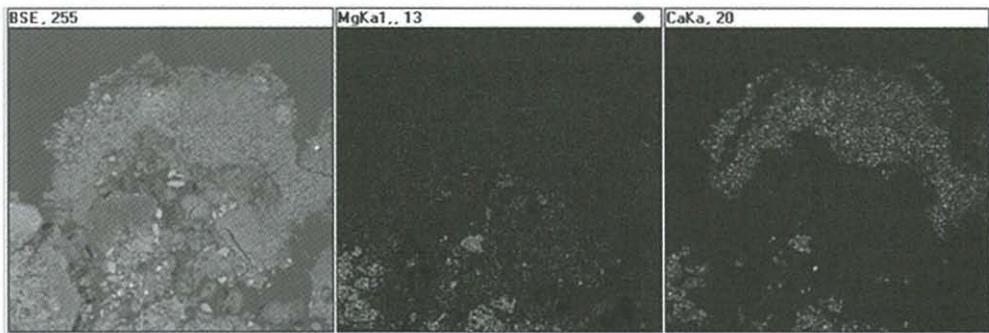


Figura 10. Imagen de SEM-BSE y mapas de distribución de Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) obtenidos por EDS del liquen mostrado en la Figura 9.

Por otro lado, también hay que tener en cuenta la acción mecánica que ejercen estos microorganismos en la piedra. La observación de las imágenes de SEM-BSE nos da idea de la alteración mecánica que por fuerzas físicas puede ejercer un liquen sobre el sustrato (Figura 2). El crecimiento del liquen, los ciclos de hidratación-deshidratación, así como los de congelación-descongelación sobre todo en estado hidratado, pueden generar presiones que conlleven a la prácticamente segura alteración del sustrato pétreo. Las tensiones generadas en el sustrato debidas a la presencia de agua en los talos liquénicos, en asociación a otros microorganismos litobióticos, o entre los minerales del sustrato, pueden intuirse de la observación de imágenes obtenidas con la técnica SEM-BSE. Sin embargo, la confirmación de estos fenómenos se obtiene gracias a observaciones con microscopía de barrido a bajas temperaturas (LTSEM). Esta microscopía, al llevar a cabo la observación de la muestra en estado congelado, permite estudiarla en su estado natural de hidratación y localizar el agua [14]. Esta técnica ha sido aplicada al estudio de biodeterioro por primera vez por nuestro grupo de investigación [9]. Por otro lado, otro aspecto a destacar de esta

técnica es que permite analizar la red de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que existen en los biofilms y a las cuales se les atribuye cada vez un papel más importante en los procesos de alteración mineral. En la Figura 12 podemos ver una imagen coloreada de cómo un conjunto de algas verdes está inmerso en una red de EPS, que ocupa en su totalidad la cavidad de la roca, cuando el biofilm está hidratado. De la misma manera, es posible analizar con ella las relaciones entre los EPS, los microorganismos y los minerales (Figura 13).



Figura 11. Imagen de CSLM de un talo liquénico crustáceo teñido con el indicador de pH fluorescente CI-NERF. La escala indica los colores correspondientes a los distintos pH.

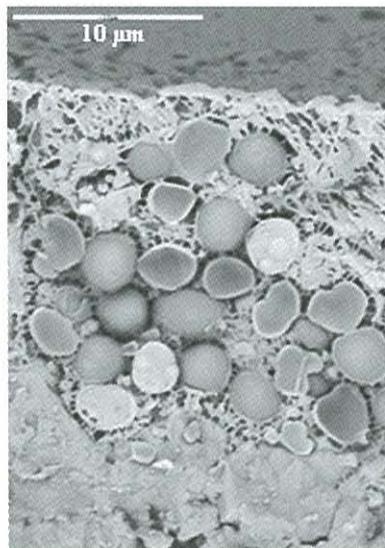


Figura 12. Imagen de LTSEM de una cavidad presente en una dolomía de la Iglesia de la Veracruz (Segovia) ocupada por un biofilm hidratado de algas verdes, donde se ha coloreado en verde las células, en marrón la piedra y en rosa la red de EPS.

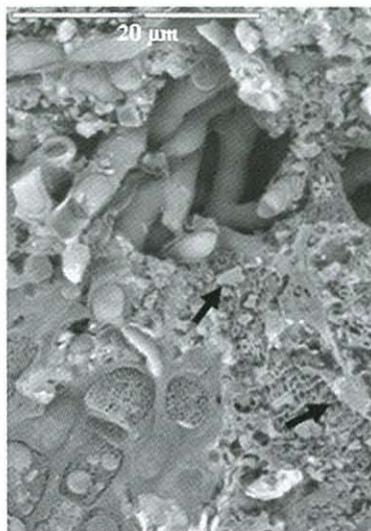


Figura 13. Imagen de LTSEM de un talo líquénico colonizando dolomías de la Iglesia de la Veracruz. Las flechas indican los fragmentos minerales inmersos en la red de EPS (asteriscos).

2.3. Evaluación *in situ* de la eficacia de tratamientos para eliminar el biodeterioro

Las dos fases anteriores permiten diseñar las estrategias de tratamiento más adecuadas. Esto es importante porque la aplicación incorrecta de tratamientos, debido a falta de un buen diagnóstico previo, puede conducir a que únicamente algunos microorganismos sean eliminados y se favorezca el desarrollo de otros que al carecer de competidores puedan tener un efecto más dañino. Es posible también que el diagnóstico indique que es mejor no llevar a cabo ningún tratamiento, o sólo modificar aquellos factores ambientales que inducen la colonización biológica, y así evitar un tratamiento más agresivo contra los microbiota existente y perjudicial en el ámbito medioambiental.

Por último, cuando el diagnóstico nos indica la conveniencia de un determinado tratamiento diseñado para eliminar o reducir los fenómenos de biodeterioro, es apropiado llevar a cabo una evaluación previa de los efectos. Es aconsejable estudiar el efecto de los tratamientos *in situ*, es decir, sobre los microorganismos sin extraerlos del material pétreo. Específicamente en nuestro grupo se ha investigado el efecto de distintos biocidas en una pared del Monasterio de los Jerónimos (Lisboa) [9] y en la actualidad también se están llevando a cabo experimentos similares sobre rocas de cantera, para poder extrapolar después al monumento. Como la aplicación de los biocidas se hizo en el caso del Monasterio de los Jerónimos de Lisboa, sobre los microorganismos inmersos en la superficie de los paramentos, la evaluación del efecto real sobre la estructura (y por tanto la fisiología) de los citados microorganismos, debe también llevarse a cabo sobre estos, sin extraerlos de la piedra. Esta evaluación se hace por SEM-BSE, CSLM y por TEM. Mientras que con SEM-BSE obtenemos imágenes claras de los efectos de los biocidas directamente sobre las células inmersas en el sustrato pétreo, CSLM permite valorar la vitalidad de los microorganismos tras los tratamientos. Por último, TEM nos permite conocer detalles más precisos sobre la acción concreta de los biocidas en la ultraestructura celular. Los biocidas de mayor efectividad son aquellos que producen el colapsamiento celular y la pérdida de la estructura interna.

3. PRINCIPALES CASOS ESTUDIADOS

En nuestro Grupo se han analizado con este tipo de estrategias los procesos de biodeterioro de diferentes monumentos históricos como la Catedral de Jaca [5], Torre de Belén (Lisboa) [8], el Monasterio de los Jerónimos (Lisboa) [9, 15], la Iglesia del convento de Santa Cruz la Real (Segovia) [6], el Castillo de Biar y otros monumentos alicantinos [10, 16] y las iglesias románicas segovianas de San Millán, La Veracruz, San Martín y San Lorenzo [10, 17, 18]. En todos ellos se han detectado fenómenos de alteración mecánica y química, asociados a la presencia y acción de líquenes y otros organismos litobióticos como cianobacterias, bacterias heterótrofas y hongos.

4. EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

El procedimiento expuesto arriba ha sido resultado de la evolución de nuestro propio grupo de Investigación. Los estudios llevados a cabo en la década de los 90, especialmente con el uso de TEM, pusieron de manifiesto, por primera vez, los efectos de los talos liquénicos sobre los minerales [4]. Posteriormente el desarrollo de la técnica SEM-BSE como ya ha sido comentado arriba, fue crucial para el desarrollo de la estrategia del estudio de los procesos de biodeterioro por microscopía *in situ* [19]. En los últimos años esta estrategia se ha completado con el uso de técnicas de biología molecular haciéndola mucho más resolutive [18]. En la actualidad este procedimiento está siendo aplicado de manera completa al estudio de los fenómenos de biodeterioro en distintas edificaciones construidas con materiales tradicionales de canteras de la Comunidad de Madrid, bajo el desarrollo del Proyecto de la Comunidad de Madrid de título "Durabilidad y conservación de materiales tradicionales naturales del Patrimonio Arquitectónico". Estamos combinando estudios de piedra de cantera donde se analiza la secuencia de colonización microbiana y los efectos de distintos tratamientos, con diagnósticos de procesos de biodeterioro de monumentos construidos con el mismo tipo de piedra, y que muestran signos de alteración.

Todos estos estudios son fundamentales para proteger, conservar y en su caso restaurar el monumento, pero además esta investigación aplicada a los bienes culturales también participa en cierta manera de su puesta en valor, lo que favorece su conocimiento y así también su mantenimiento [17].

5. AGRADECIMIENTOS

Nuestro Grupo de Investigación quiere agradecer la ayuda técnica de Teresa Carnota, Sara Paniagua, Fernando Pinto, Isabel Salmean y Charo Santos. Se agradece también la financiación de la Comunidad de Madrid a través del Proyecto MATERNAS (S0505-MAT/000094).

6. REFERENCIAS

- [1] Wierzcchos, J., Ascaso, C. (1994): Application of back-scattered electron imaging to the study of the lichen rock interface. *Journal of Microscopy* 175: 54-59.
- [2] Ascaso, C., Wierzcchos, J. (1994): Nuevas aplicaciones de las técnicas submicroscópicas en el estudio del biodeterioro producido por talos liquénicos. *Microbiología SEM* 10: 103-110.
- [3] Ascaso, C., Wierzcchos, J. (1995): Study of the biodeterioration zone between the lichen thallus and the substrate. *Journal of Cryptogamic Botany* 5: 270-281.
- [4] Ascaso, C., Ollacarizqueta, M.A. (1991): Structural relationship between lichen and carved stonework of Silos Monastery, Burgos, Spain. *International Biodeterioration* 27: 337-349.

- [5] Ascaso, C., Wierzchos, J., Castelló, R. (1998a): Study of the biogenic weathering of calcareous litharenite stones caused by lichen and endolithic microorganisms. *International Biodeterioration and Biodegradation* 42: 29-38.
- [6] De los Ríos, A., Galván, V., Ascaso, C. (2004): In situ microscopy diagnosis of biodeterioration processes occurring in the convent of Santa Cruz la Real (Segovia, Spain). *International Biodeterioration and Biodegradation* 54: 113-120.
- [7] De los Ríos, A., Ascaso, C. (2005): Contributions of *in situ* microscopy to current understanding of stone biodeterioration processes. *International Microbiology* 8: 181-188.
- [8] Ascaso, C., Wierzchos, J., Delgado Rodrigues, J., Aires-Barros, L., Henriques, F.M.A., Charola, A.E., (1998b): Endolithic microorganisms in the biodeterioration of the tower of Belem. *Internationale Zeitschrift für Bauintandsetzen* 4: 627-640.
- [9] Ascaso, C., Wierzchos, J., Souza-Egipsy, V., de los Ríos, A., Delgado Rodrigues, J. (2002): *In situ* evaluation of the biodeteriorating action of microorganisms and the effects of biocides on carbonate rock of the Jerónimos Monastery (Lisbon). *International Biodeterioration and Biodegradation* 49: 1-12.
- [10] Cámara, B., De los Ríos, A., García-del-Cura, M.A., Galván V., Ascaso, C. (2008): Biorreceptividad de las dolomías a la colonización fúngica. *Materiales de Construcción* (en prensa).
- [11] Ascaso, C., Wierzchos, J., de los Ríos, A. (1995): Cytological investigations of lithobiontic microorganisms in granitic rocks. *Botanica Acta* 108: 474-481.
- [12] Wierzchos, J., Ascaso, C. (1996): Morphological and chemical features of bioweathered granitic biotite induced by lichen activity. *Clays and Clay Minerals* 44: 652-657.
- [13] De los Ríos, A., Wierzchos, J., Sancho, L.G., Ascaso, C. (2003): Acid microenvironments in microbial biofilms of Antarctic endolithic microecosystems. *Environmental Microbiology* 5: 231-237
- [14] Ascaso, C. (2000): Lichens on rock substrates: observation of the biomineralization processes. *Bibliotheca lichenologica* 75: 127-135.
- [15] De los Ríos, A., Ascaso, C., Wierzchos, J. (1999): Study of lichens with different state of hydration by the combination of low temperature scanning electron and confocal laser scanning microscopies. *International Microbiology* 2: 251-257.
- [16] Ascaso, C. (2000): Lichens on rock substrates: observation of the biomineralization processes. *Bibliotheca lichenologica* 75: 127-135.
- [17] Ascaso, C., García del Cura, M.A., de los Ríos, A. (2004): Microbial biofilms on carbonate rocks from a quarry and monuments in Novelda (Alicante, Spain). In: L.L. St. Clair, M.R.D. Seaward (eds.) *Biodeterioration of stone surfaces. Lichens and biofilms as weathering agents of rocks and cultural heritage*, 79-98. Dordrecht: Kluwer Academic Press.
- [18] Galván, V., De los Ríos, A., Ascaso, C. (2006): Reevaluating the cultural value of Segovia's Romanesque churches. En R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez Heras y C. Vazquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 305-310. London: Taylor and Francis.
- [19] De los Ríos, A., Galván, V., Cámara, B., García del Cura, M.A., Ascaso, C.: Romanesque temples from Segovia under biodeterioration diagnosis and reevaluation. (en preparación).
- [20] Ascaso, C., Wierzchos, J., de los Ríos, A. (1998): In situ cellular and enzymatic investigations of saxicolous lichens using correlative microscopical and microanalytical techniques. *Symbiosis* 24: 221-234.

MICROBIOLOGÍA Y PATRIMONIO CULTURAL

Cesáreo Sáiz Jiménez y Juan M. González Grau

Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología
Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Apartado 1052
41080 Sevilla

Resumen. El grupo de investigación "Microbiología y Patrimonio Cultural" inició sus actividades hace 30 años con un primer encargo consistente en investigar las causas del deterioro de los murales de Vázquez Díaz, en el Monasterio de Santa María de la Rábida, Huelva. Desde entonces la evolución del grupo ha sido constante, adoptando las técnicas de análisis más modernas, diseñando nuevos métodos y muestreos mínimamente invasivos y no agresivos, de acuerdo con las características de los materiales y monumentos a estudiar, desarrollando patentes y elaborando recomendaciones para una mejor conservación del patrimonio. En los últimos años, el empleo de técnicas moleculares ha permitido avanzar enormemente en el conocimiento de las comunidades microbianas que afectan al patrimonio y determinar cuales deben ser los microorganismos dianas, sobre los que hay que centrar la investigación, por presentar una mayor actividad metabólica y producir un mayor biodeterioro.

1. LOS COMIENZOS DEL GRUPO

En el año 1979 las pinturas murales de Daniel Vázquez Díaz, realizadas entre 1929 y 1930 y concebidas como el "Poema del Descubrimiento", presentaban un alarmante estado de deterioro. Las pinturas se realizaron sobre los muros originales del monasterio, que les sirve de soporte, y sobre los que el pintor preparó un enlucido de cal y arena, de textura rugosa, en el que aplicó los pigmentos utilizando la técnica de pintura al fresco. La degradación de los frescos comenzó, según los testimonios recogidos, a principios de los 70, periodo que coincide con el establecimiento de diversas plantas industriales en el Polo de Desarrollo de Huelva.

El deterioro se manifestaba con la aparición de eflorescencias blancas en los murales del Colón Soñador y en parte de los murales de Los Monjes y de La Despedida (Figura 1), que son los que tenían sus muros exteriores sometidos directamente a la acción de los agentes atmosféricos. Posteriormente aparecieron manchas con tonalidades desde el verde oscuro al negro y descamaciones superficiales, que mostraban claramente un origen biológico. Asimismo, se observó una progresiva y generalizada decoloración de los frescos, particularmente en las zonas cubiertas de eflorescencias, que una vez eliminadas no recuperaban su color original.

La colonización de microorganismos sobre los frescos no era más que una consecuencia de los procesos de alteración físico-químicos que habían sufrido las pinturas y su soporte. El dióxido de azufre, los aerosoles marinos y la humedad del ambiente originaron que los materiales de los murales fueran atacados durante la primera década de implantación del Polo de Desarrollo de Huelva. En efecto, los contaminantes atmosféricos y sobre todos ellos el dióxido de azufre con un total de 5 días de emergencia total ($1.400-2.200 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 31 días de emergencia de segundo grado ($800-1.400 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y 125 de emergencia de primer grado ($400-800 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en el periodo 1975-1980 mostraban claramente el grado de contaminación de Huelva y sus alrededores, en una época en que las medidas de control ambiental o no existían o no se aplicaban con el rigor actual [1].

La superficie de los murales presentaban abundantes cristales de yeso como consecuencia de la conversión del dióxido de azufre en ácido sulfúrico y su ataque a la calcita de los murales. La presencia de sulfatos y sulfuros determinaban el desarrollo de especies de *Thiobacillus* y *Desulfovibrio*, que fueron aisladas de los frescos. La hipótesis de una acción agresiva de los productos del metabolismo de los *Thiobacillus* y *Desulfovibrio* sobre los frescos resultaba ciertamente sugestiva, pero minimizada por la brutal concentración de dióxido de azufre en la atmosfera y la formación de ácido sulfúrico en la superficie de los frescos, que debería ser el principal factor de degradación de los frescos, siendo las comunidades microbianas del ciclo del azufre una consecuencia del progreso del ataque químico y de la existencia de un nicho favorable para el desarrollo bacteriano. La existencia de estas comunidades debió suponer un primer aporte orgánico a los frescos, a partir del cual siguió una sucesión de otras bacterias heterótrofas y hongos que se nutrían a partir de la materia orgánica sintetizada por los microorganismos pioneros. También ayudaban al aporte de materia orgánica la textura rugosa de la superficie de los frescos, que incitaba a los visitantes a tocarla, aportando ácidos grasos y aminoácidos habitualmente presente en la piel humana, así como los compuestos orgánicos volátiles presentes en el aire y procedentes de las industrias del Polo, como hidrocarburos y ácidos orgánicos emitidos por la refinera de petróleo y la planta de celulosa, que quedarían retenidos en las películas de agua de condensación.

Sobre los frescos se identificó una abundante comunidad microbiana donde se aislaron especies de los géneros *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Nocardia* y *Streptomyces*. Entre los hongos destacaban *Cladosporium sphaerospermum*, *Engyodontium album* y *Aspergillus versicolor*, entre otros muchos. El primero apareció en todos los aislamientos efectuados a lo largo del estudio, estando ampliamente distribuido por todos los murales (Figura 1) y siendo relacionado directamente con los procesos de aparición de manchas verde oscuras y de descamación [2].



Figura 1. Mural de La Despedida. Monasterio de Santa María de la Rábida, Huelva. Deterioro producido por la presencia de eflorescencias y la colonización del hongo *Cladosporium sphaerospermum* (manchas verdes). El crecimiento del hongo produjo exfoliaciones de la capa pictórica.

La existencia del ácaro *Tyrophagus palmarum* en los murales, que se alimentaba de las bacterias y hongos, contribuyó a la eficaz dispersión de los microorganismos por todas las pinturas.

En este primer estudio del grupo se llevó a cabo un detallado estudio de la contaminación ambiental de la zona, con determinación de los niveles de contaminación y el tipo de contaminantes, una caracterización de los productos de alteración de los materiales y un completo estudio microbiológico, demostrando que el deterioro de los murales de Vázquez Díaz fue un claro ejemplo de los efectos combinados de la contaminación atmosférica y de una inadecuada conservación de las pinturas por el mantenimiento de puertas y ventanas de la sala abiertas. Las pinturas eran así expuestas al agresivo ataque químico de los contaminantes atmosféricos de Huelva, lo que junto al elevado número de visitantes en una sala pequeña, obligó a adoptar medidas correctoras para la eliminación de la humedad, mediante la creación de una barrera de resina que impidiera el ascenso por capilaridad del agua en los muros, el control de la humedad ambiental, el tratamiento de los microorganismos y la restauración de las pinturas.

2. BIODETERIORO DE LA PIEDRA

Coincidiendo en el tiempo los estudios se extendieron al biodeterioro de la piedra de la Giralda y de la catedral de Sevilla por líquenes, musgos y plantas [3-5], cuyas recomendaciones sirvieron de base para la restauración [6].

Las piedras utilizadas en la construcción de las catedrales son susceptible de ser colonizadas por microorganismos. Una piedra extraída de la cantera y situada en una construcción suele sufrir un previo acondicionamiento, consistente en una alteración por causas naturales: lluvia, viento, heladas, etc. que conduce a un proceso de alteración de minerales, movilización de sales, microfisuras, que facilitan el asentamiento de microorganismos. Un factor importante en la colonización es la presencia de materia orgánica, fuente de carbono necesaria para los microorganismos. En muchos casos ese aporte lo facilitan las aves, cuyos deyecciones enriquecen el sustrato, de ahí que sobre las piedras de las catedrales se desarrolle una variada comunidad líquénica oritocófila [3].

Existe una variedad de respuestas de cada tipo de piedra a la colonización microbiana, siendo unas más resistentes que otras. Las calizas suelen ser el tipo sobre el que se asientan con facilidad las más diversas comunidades microbianas. Un estudio sobre la bioreceptividad de distintos materiales permitió definir los parámetros a considerar, tales como pH, porosidad, textura, presencia de sales solubles, etc. Casos extremos de resistencia a la colonización son el mármol, por su escasa porosidad, mientras que los morteros son los más susceptibles o bioreceptivos por su gran porosidad y capacidad de retener agua, si bien su elevado pH puede inhibir el crecimiento de algunos microorganismos [7].

El crecimiento en superficie de películas microbianas, compuestas por diferentes microorganismos produce un deterioro tanto mecánico (Figura 2) [8], como físico y químico [9, 10]. Este crecimiento también puede tener lugar en el interior de la piedra, lo que conduce a un desprendimiento en placas [11]. Tanto los factores que afectan al crecimiento de películas microbianas en la superficie de la piedra como la descripción de sus efectos fueron objeto de diversas revisiones y monografías y se han publicado un elevado número de artículos sobre catedrales, iglesias y monumentos europeos, americanos y asiáticos. Se han investigado aspectos específicos como la bioreceptividad de la piedra, ecología microbiana, fisiología de los microorganismos, etc. [12-16].

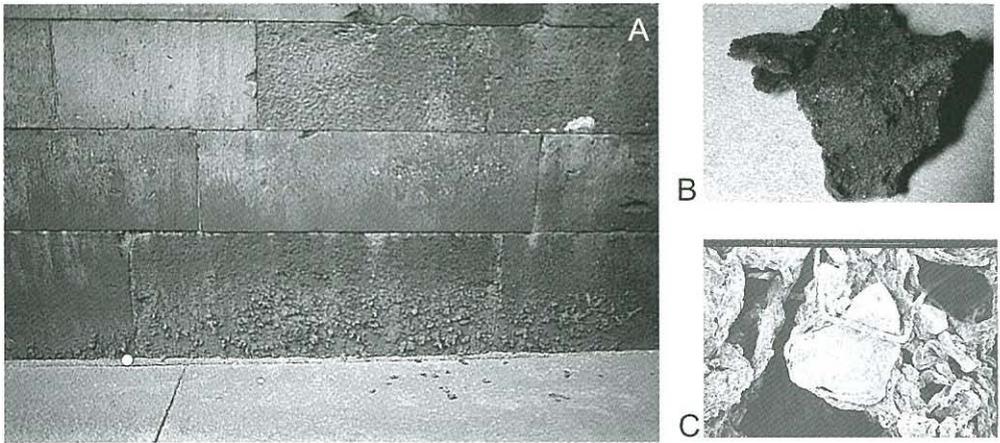


Figura 2. Deterioro mecánico producido por el crecimiento de una película microbiana, cuyo principal componente era el alga *Klebsormidium flaccidum*, sobre la piedra de la catedral de Lund, Suecia. Los filamentos del alga retienen agregados de partículas. Cuando la película se seca, se contrae, desprendiéndose de la superficie de la piedra y produciendo una considerable erosión mecánica al llevarse con ella las partículas.

Todo ello llevó a comprender los procesos biológicos de colonización que tiene lugar en la naturaleza y demostrar cómo pueden afectar al Patrimonio Histórico. Ello tuvo su reflejo en un reciente trabajo donde se demuestra que el ennegrecimiento de monumentos en Irán (Figura 3) no se debía a los efectos de la guerra del Golfo, como reclamaron las autoridades culturales iraníes ante la Comisión de Compensación de las Naciones Unidas, sino al crecimiento de cianobacterias sobre la piedra [17].



Figura 3. Relieves de Shapur en Bishapour, Irán. Las manchas negras que afectan al conjunto de diversos relieves fue considerada como resultado de la deposición de la materia particulada producida en la combustión de los pozos de petróleo, durante la guerra del Golfo. Realmente son antiguas colonizaciones de cianobacterias, principalmente del género *Nostoc*, que en su senescencia adoptan un color negro.

El tratamiento de la piedra, tanto con consolidantes como con biocidas fue investigado en monumentos italianos y españoles, destacando el caso del Templo Mudéjar del Monasterio de Guadalupe [18-21].

2. LA CONSERVACIÓN DE CONJUNTOS ARQUEOLÓGICOS

El grupo coordinó en la década de los 90 la investigación sobre la conservación de los mosaicos de Itálica (Sevilla) en un proyecto del Plan Nacional y, mediante convenio con la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía, las investigaciones en la ciudad de Baelo Claudia (Cádiz) y en la Necrópolis de Carmona. En todos los casos el objetivo fue conocer las causas del deterioro y elaborar recomendaciones para la conservación de los conjuntos.

Los mosaicos de Itálica, por su exposición al aire, sin protección o cubierta como existen en otros conjuntos, tales como los de la Villa Imperial del Casale, en Piazza Armerina, Sicilia [22], presentaban un elevado grado de deterioro que afectaban no solo al mortero [23, 24], sino a las teselas, muchas de las cuales estaban colonizadas por líquenes que producían perforaciones, ya fueran calizas, vítreas (Figura 4) o de poliéster, estas últimas introducidas en las restauraciones de los años 60 [25-31]. En algunos mosaicos, por su especial orientación, la colonización se limitaba a los morteros, que al retener la humedad durante más tiempo permitía el crecimiento de musgos. Ello originaba que las teselas se desprendieran al destruirse el mortero. En otros casos, como en el mosaico del Planetario, los musgos crecían bajo las teselas vítreas (Figura 5), ya que estas dejaban pasar la luz solar, retenían la humedad y bajo la tesela se constituía un nicho perfecto para su crecimiento.



Figura 4. Mosaico de Tellus, Casa de los Pájaros, Conjunto Arqueológico de Itálica. Teselas vítreas colonizadas por líquenes. El crecimiento de líquenes endolíticos en el interior de las teselas verdes y azules aparece como perforaciones, mientras que las teselas amarillas, con elevado contenido en plomo, presentan un deterioro químico en forma de exfoliaciones.

La alteración de las teselas no sólo era biológica, sino también química, por alteración de algunos de los componentes de la pasta vítrea, particularmente cuando poseían un elevado contenido en plomo (Figura 4) [30]. Algunos ejemplos de deterioro de mosaicos fueron publicados por Rodríguez Hidalgo et al. [31].

En la ciudad romana de Baelo Claudia, el estudio de los morteros permitió confirmar que existía una abundante colonización epilítica (sobre la superficie) y endolítica (en el interior) de cianobacterias, algas y líquenes [32]. El tipo de comunidad y grado de colonización lo determinaban el microclima y las características físico-químicas del propio mortero [33, 34]. En algunos casos, las cianobacterias y algas presentaban interés taxonómico y ecológico

(35-38). No sólo los morteros de las paredes de los templos, sino el pavimento de piedra del Foro estaba sometido a una intensa colonización, en este caso por líquenes [39]. La colonización afectaba incluso a los materiales consolidados, donde los líquenes se encontraban en el interior del mortero, constituyendo un nicho endolítico, y desde el interior degradaba el consolidante que recubría la superficie [40].

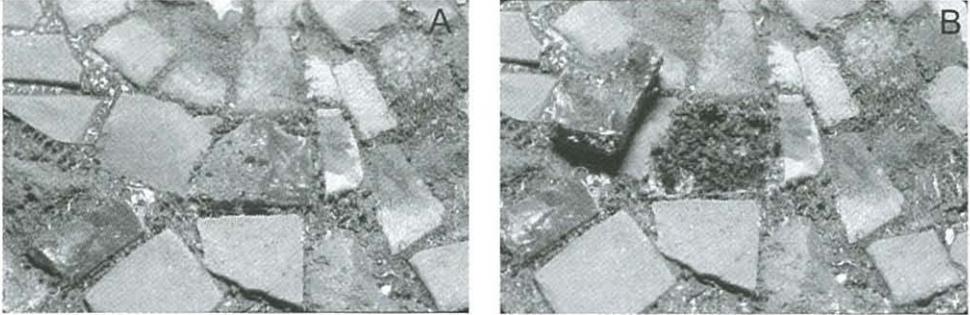


Figura 5. Mosaico del Planetario, Conjunto Arqueológico de Itálica. La deficiente restauración con material inapropiado (teselas obtenidas a partir de trozos de vidrio verde de botella) produjo una colonización de musgos bajo ellas, como consecuencia de la retención de humedad bajo la tesela y la penetración de los rayos solares. El crecimiento conducía al desprendimiento de la tesela.

La Necrópolis de Carmona, Sevilla, excavada en una antigua cantera de calcarenita, presenta importantes problemas de deterioro, debido a la naturaleza de la roca, y a la exposición de las tumbas a los agentes atmosféricos. Se estudiaron los efectos de las comunidades líquénicas sobre los morteros [41, 42], la colonización de una pequeña tumba por comunidades de cianobacterias (Figura 6) [43], la presencia de microorganismos en las pinturas murales de la Tumba de Servilia [44] y los efectos de la limpieza y tratamiento con biocida en una tumba y su posterior recolonización [45].



Figura 6. Crecimiento de la cianobacteria *Scytonema julianun* en el Mausoleo Circular, Necrópolis de Carmona.

El deterioro de las pinturas murales de las catacumbas de San Calixto y de Domitila, Roma, por cianobacterias es favorecido por la iluminación artificial (Figura 7), aspecto que fue investigado en un proyecto europeo [46]. La descripción del efecto de las visitas, el tipo de comunidad microbiana inducida por la iluminación [47], la bioinducción de cristales de sales de bario [48], la existencia de Acidobacteria en las películas microbianas [49] o el descubrimiento de nuevas especies de bacterias [50-52] fueron algunos de sus logros. Asimismo, se demostró que la utilización de luz verde inhibía el crecimiento de cianobacterias [53], lo que podría utilizarse como método de control.

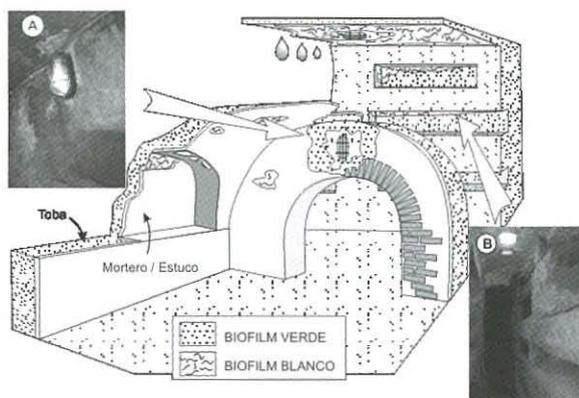


Figura 7. Representación de un cubículo de la catacumba de San Calixto, Roma, donde se muestra el efecto de la iluminación y la humedad. Cercana a las fuentes de luz se desarrollaban películas microbianas verdes, formadas principalmente por cianobacterias (A), mientras que en zonas más alejadas aparecían películas blancas cuyos componentes mayoritarios eran actinobacterias (B).

3. EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA SOBRE LOS MONUMENTOS

Los efectos de la contaminación atmosférica sobre la piedra han sido objeto de conferencias, monografías, libros y congresos [54-65]. Ya en 1981 se describieron las costras negras sulfatadas existentes en la catedral de Sevilla [57] y, posteriormente, se efectuaron detallados estudios mineralógico, inorgánico y orgánico de los componentes de las costras [58, 59]. Los estudios efectuados sirvieron para comprender el impacto que el tráfico rodado tenía sobre la piedra de la catedral y como de entre todos los vehículos, el transporte público resultaba el más contaminante [55]. Curiosamente, las procesiones de Semana Santa también contribuían a la emisión de materia particulada a la atmósfera [65], destacándose el efecto de estas en la contaminación del aire en el centro de la ciudad, cuando el tráfico estaba interrumpido por las procesiones.

Las investigaciones se extendieron a otros monumentos europeos constatándose una similitud entre los distintos grupos de compuestos orgánicos contaminantes procedentes de las emisiones de vehículos de motor [60, 61]. Para la investigación se pusieron a punto nuevos métodos que permitieron una eficaz y completa caracterización de los distintos compuestos presentes en las costras [62, 63]. Igualmente, se estudiaron los aerosoles de las atmósferas de París, Florencia, Milán y Sevilla (Figura 8) [64, 65] y se relacionaron con los procesos de ennegrecimiento de las piedras de sus iglesias y catedrales.

La aparición de un amarilleamiento en las piedras sometidas a limpieza mediante láser fue objeto de estudio en la Basílica de Saint Denis, París. Mediante convenio con el Ministerio

de la Cultura y Comunicación de Francia se investigaron las causas del amarilleamiento, encontrándose no sólo su origen, sino también la forma de eliminarlo [66-68].

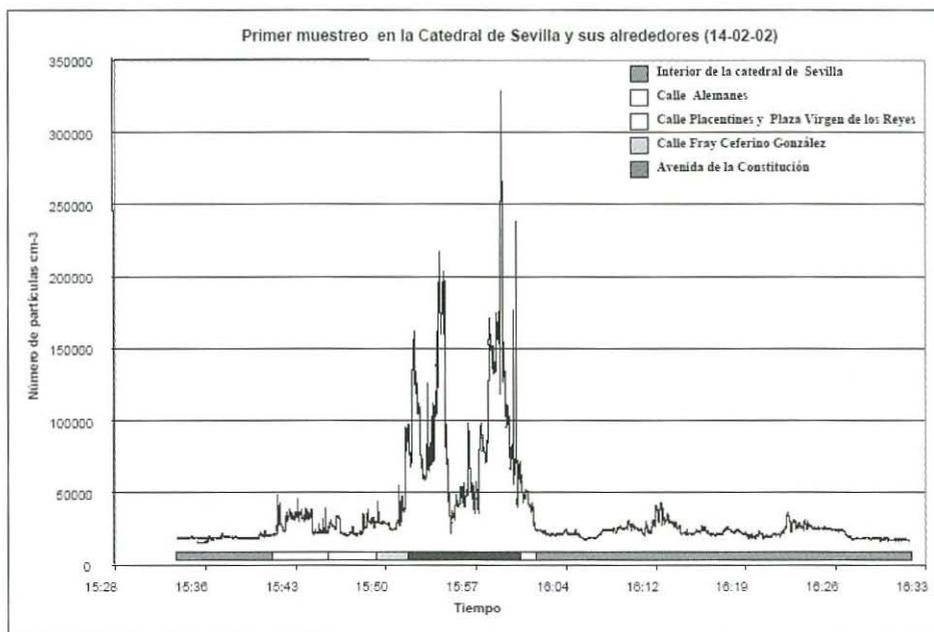


Figura 8. Muestreo de partículas alrededor de la catedral de Sevilla. Las máximas concentraciones se producían al paso de autobuses municipales por la Avenida de la Constitución, mientras que las calles con tráfico limitado o sin él presentaba concentraciones 15 veces inferiores.

4. LA CONSERVACION DE PINTURAS RUPESTRES EN CUEVAS Y ABRIGOS

La conservación del arte rupestre de cuevas constituye la línea a la que el grupo ultimamente dedica más recursos. Las investigaciones están actualmente apoyadas por el Ministerio de Cultura (Cueva de Altamira), Ministerio de Cultura y Comunicación de Francia (Cueva de Lascaux), Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía (Cueva de Doña Trinidad) y Gobierno de Aragón (abrigos con pinturas rupestres). Anteriormente se estudiaron una serie de abrigos andaluces y otras cuevas de Asturias y Cantabria [69-71].

Las cuevas son ecosistemas relativamente cerrados donde los microorganismos encuentran una temperatura estable, una humedad relativa alta y un contenido en materia orgánica variable, dependiendo del grado de eutrofización [72]. Las cuevas, como cualquier otro nicho de este planeta, han sido colonizadas naturalmente por microorganismos. Estos se encuentran en la cueva aún antes de ser descubierta y permanecen en ella después de su apertura y adaptación para las visitas. La gestión de una cueva determinará el cambio o sucesión de las comunidades microbianas, dependiendo de la instalación de iluminación, de las actividades agrícolas o industriales en los suelos bajo los que se encuentra la cueva [73, 74], o de la modificación de los parámetros ambientales inducidos por una visita masificada.

La comprensión de los problemas de origen microbiológico en una única cueva es difícil, si ello no se aborda desde una perspectiva global, donde han de intervenir diversos campos del conocimiento, como microclimatología, geoquímica, (proporcionados en nuestro caso por

la colaboración con el equipo del Departamento de Geología del Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC), geomicrobiología, ecología microbiana, biología molecular, etc.

La posibilidad de estudiar diversas cuevas permite obtener un conocimiento del problema, a través de la diversificación de situaciones. Así, por ejemplo, se encuentra una invasión fúngica por *Fusarium solani* en Lascaux [75], una bacteriana, casi exclusiva, por especies de *Pseudonocardia* en Doña Trinidad (Figura 9) [76] y otra general, con diversos tipos de bacterias, en Altamira [77-81]. Las razones para la reciente invasión de hongos en Lascaux es aún objeto de especulación, no habiéndose llegado a una propuesta definitiva. Las causas de la elevada mono-especificidad en Doña Trinidad no se conocen, pero estudios recientes han demostrado que *Pseudonocardia* también coloniza abundantemente las paredes de la cueva de Santimamiñe, a más de 1.000 km de distancia, y está presente en otras cuevas, aunque no con una tan extensa representación. *Pseudonocardia* podría ser un género de bacterias especializado en la colonización de cuevas y el seguimiento de sus características ecológicas y fisiológicas podría aportar información sobre el proceso.

Para entender la elevada biodiversidad encontrada en Altamira se ha de tener en cuenta la existencia de ganadería en el prado bajo el que se encontraba la cueva, actividad afortunadamente desaparecida. Sin embargo, los suelos presentan un abundante contenido en materia orgánica por acumulación de los excrementos, de ahí el aislamiento de bacterias fecales en las agua de goteo recogidas en la propia cueva [73]. Igualmente, esta agua contenía materia orgánica disuelta [74], lo que convierte a Altamira en una cueva eutrofizada, donde los microorganismos heterótrofos y particularmente las actinobacterias [72, 77] encuentran un hábitat idóneo.

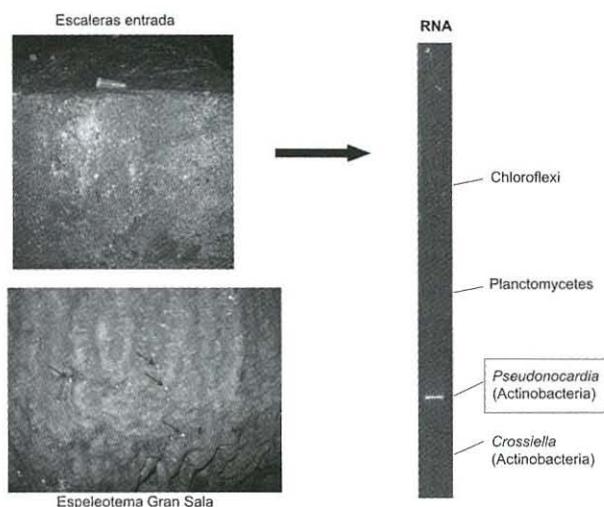


Figura 9. Colonización por especies del género *Pseudonocardia* en la cueva de Doña Trinidad, Ardales, Málaga.

La colonización por microorganismos en una cueva presenta una doble vertiente, por una parte el desconocimiento de las causas que favorecen su dispersión por todo el ecosistema, y por otra, la posibilidad de que la colonización afecte a las pinturas [78]. El control de los microorganismos en una cueva es prácticamente imposible por los grandes volúmenes y extensiones de cada cueva, que impiden cualquier tratamiento, por la ausencia de control sobre las aguas de infiltración y su contenido en nutrientes y materia orgánica, por la inaccesibilidad a todos los lugares, bien sea por encontrarse con un conglomerado de

estalactitas y estalagmitas, o por no poder alcanzar las grandes alturas que las cuevas presentan. La existencia de murciélagos u otro tipo de fauna protegida dificulta aún más el problema y, por último, las visitas [82], que en muchos casos representan una fuente de ingreso para la comunidad rural cercana, son difíciles de suprimir.

Además de todos estos problemas, el microbiólogo encuentra una serie de limitaciones, unas impuestas por la propia naturaleza del bien a proteger, que impide disponer de muestras suficientes para analizar en el laboratorio, y otras derivadas de la propia metodología a emplear.

Hasta hace muy poco tiempo, los estudios microbiológicos se efectuaban mediante muestreos de cantidades representativas, cultivos en el laboratorio y aislamiento de las cepas. Generalmente, el aislamiento de una serie de microorganismos se consideraba como prueba irrefutable de la existencia de un proceso de biodeterioro en el que, equivocadamente, se implicaba al microorganismo aislado. Partiendo de la base de que, en muchos casos, las cantidades de muestras estaban lejos de ser representativas, sobre todo si se pretendía estudiar una pintura rupestre, y solo se podían disponer de unos pocos mg, la probabilidad de que los microorganismos cultivados a partir de esa minúscula muestra fueran representativos de los que producían la colonización o el biodeterioro era mínima, por no decir nula. A favor de este razonamiento se encontrarían varios hechos:

1. Los aislamientos eran particularmente sospechosos. Siempre aparecían representantes de bacterias productoras de esporas (*Bacillus*, *Streptomyces*) y los hongos más ubícuos (*Aspergillus*, *Penicillium* y *Cladosporium*).
2. Estos aislamientos solían ser repetitivos y muy similares, independientemente del lugar o material investigado. Estos mismos microorganismos se encontraban tanto en el interior de un archivo, una vivienda, como en el aire exterior.
3. La producción de algún tipo de metabolito por el microorganismo aislado en un cultivo de laboratorio era considerado como prueba de su presencia en el material biodeteriorado, y por tanto de un efecto nocivo para el bien cultural, equiparando con ello el metabolismo del microorganismo en la naturaleza con el forzado y artificial en el laboratorio.
4. No todos los microorganismos son capaces de crecer en medios sintéticos de laboratorio, por lo que existía el riesgo de que muchos de ellos permanecieran ignorados.

Los resultados obtenidos de muestreos convencionales pueden explicarse porque las bacterias y los hongos encontrados con abundancia en el aire son los que producen una mayor cantidad de esporas dispersables. Estas esporas crecen fácilmente en el laboratorio en los medios de cultivos. Su crecimiento en placas de Petri, por tanto, no era una prueba de su implicación en el biodeterioro, sino de su ubicua presencia en el planeta, que comportaba, en muchos casos, la presencia de esporas depositadas sobre el objeto deteriorado, al igual que las mismas existen sobre cualquier otra superficie o material, independientemente de si estaba alterado o no.

5. DESARROLLO DE TÉCNICAS MOLECULARES Y SU APLICACIÓN AL ESTUDIO DEL PATRIMONIO

Con la introducción de las técnicas de biología molecular en los estudios de patrimonio se comprobó que los miembros de las comunidades microbianas presentes en un ecosistema eran muy distintos de los microorganismos aislados [83].

El estudio de la composición de las comunidades microbianas se realiza bien centrandose en el ADN (que revela los microorganismos presentes) o en el ARN (que revela aquellos miembros de la comunidad que están metabólicamente activos) [84].

La utilización de estas técnicas en cuevas con pinturas rupestres permitió identificar los principales microorganismos que colonizan las paredes y pinturas. Estos resultados contrastaban con los obtenidos mediante aislamiento y cultivo que, por otra parte, sólo permitían acceder a una fracción muy baja de componentes de la comunidad [83, 84]. Un ejemplo de estas diferencias se presenta en la Figura 10, que muestra el porcentaje relativo de grupos de bacterias en la cueva de Altamira, comparando métodos de cultivos y métodos moleculares.

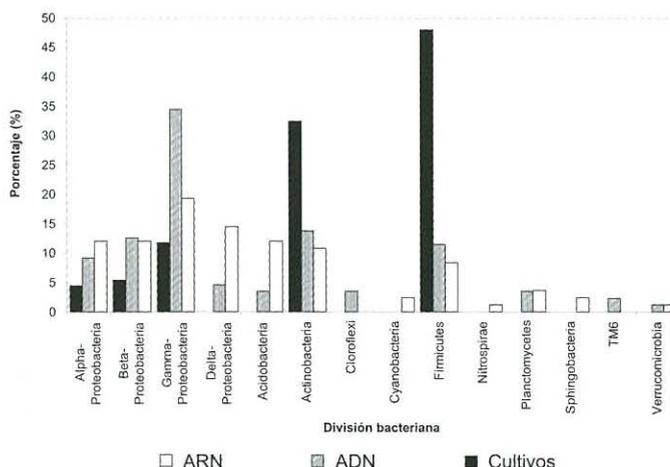


Figura 10. Comparación de resultados entre las distintas metodologías adoptadas en la Cueva de Altamira: aislamiento y cultivo, estudio de ADN (bacterias presentes) o estudio de ARN (bacterias presentes y metabólicamente activas).

La imposibilidad de tener muestras de tamaño convencional en los estudios de patrimonio, debido al deterioro que produciría el muestreo, nos llevó a centrar la investigación en el desarrollo y la adecuación de metodologías y técnicas aplicables a bienes culturales, donde se minimizara el muestreo y daño. Fruto de ello son las estrategias para simplificar el estudio de secuencias [85, 86] o los nuevos procedimientos de amplificación [87] para incrementar el umbral de detección de los microorganismos. Todo ello ha mejorado sensiblemente nuestra capacidad para llevar a cabo los estudios realizados y la metodología diseñada ha servido de base a otros grupos, dentro y fuera del campo del patrimonio histórico, incluyendo la medicina, para iniciar análisis similares con muestras de procedencia muy diversa.

Uno de los aspectos más importantes derivado del empleo de métodos moleculares fue la detección de microorganismos que nunca habían sido cultivados previamente. Por ejemplo, se encontró en la cueva de Altamira una gran diversidad de Acidobacterias [79], de Arqueas pertenecientes al grupo Crenarchaeota de baja temperatura [80], de bacterias reductoras de sulfato [81], y de otros muchos grupos bacterianos. Un hecho a destacar es que la gran mayoría de estos microorganismos son prácticamente desconocidos debido a la imposibilidad de obtener cultivos y por tanto de conocer su metabolismo y los efectos que podrían producir sobre los materiales, con el consiguiente riesgo que ello implica para la conservación de las cuevas con pinturas rupestres.

Por ejemplo, en el supuesto de que algunos de estos microorganismos llegaran a las pinturas, se puede especular que las bacterias reductoras de sulfato podrían dar lugar a

cambios significativos de pH, lo que induciría precipitación de carbonatos sobre las paredes, o el ácido sulfídrico, producto de su metabolismo, dar lugar a sulfuros metálicos que podrían alterar la coloración de los pigmentos [81]. Las Crenarchaeota de baja temperatura se cree que pudieran ser oxidadoras de amonio y, por tanto, buenas candidatas para inducir cambios de pH [80]. Algunas Acidobacterias viven en microambientes ligeramente ácidos lo que también puede tener consecuencias para la conservación de las pinturas [79]. Otros grupos cuyo metabolismo es poco o completamente desconocido y que han sido detectados en cuevas con pinturas rupestres son Bacteroidetes, Planctomycetes, Chloroflexi, Verrucomicrobia, y otras varias Divisiones bacterianas de las que aún no se ha podido cultivar ningún representante.

Estos datos indican que, en los próximos años, unos de los objetivos prioritarios en la investigación de la contaminación microbiana de cuevas con pinturas rupestres deberían ser el poder descifrar el metabolismo de las bacterias presentes, con el fin de determinar su potencial riesgo para la conservación de las pinturas rupestres y su papel en el biodeterioro de dichos enclaves.

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

El grupo ha sido referente europeo en las últimas 3 décadas en el tema de biodeterioro, como demuestra la participación, a lo largo de los últimos 20 años, en los diferentes programas de investigación de la Comisión Europea y los convenios firmados con los Ministerios de Cultura de España y Francia y las Consejerías de Cultura autonómicas, así como la obtención de proyectos del Plan Nacional de I+D.

Si bien se han investigado muy diversos temas que van desde las pinturas rupestres a las murales romanas, medievales o del siglo XX e intervenido en estudios de deterioro de la piedra, el grupo está capacitado y lleva a cabo investigaciones sobre cualquier tipo de ecosistema donde los microorganismos jueguen un papel importante en el ciclo biogeoquímico de los elementos, ya sea por el biodeterioro inducido como por la degradación de posibles compuestos contaminantes. A este respecto cabe indicar que también se estudia la biogeoquímica de las lagunas del Parque Nacional de Doñana, donde se han encontrado abundantes poblaciones de Acidobacterias [88], relativamente similares a las presentes en la cueva de Altamira [79] y a las de la catacumba de San Calixto, en Roma [49]. El conocimiento del comportamiento de bacterias en diferentes ecosistemas puede dar lugar a una mejor comprensión de su papel en los diversos hábitats en los que se encuentran.

Un aspecto que marca el interés en el estudio de la biodiversidad de cuevas es el aislamiento de nuevas especies de bacterias productoras de sustancias bioactivas como ya indicaron Groth et al. en 1999 [77]. El descubrimiento del antibiótico cervimycina [89] producido por un *Streptomyces* aislado de Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italia, durante las investigaciones efectuadas en un proyecto europeo sobre protección de pinturas rupestres, coordinado por el grupo [70-74, 77, 78, 90, 91], muestra sin lugar a dudas el valor añadido de las investigaciones en microbiología del patrimonio, e indican cómo puede existir una transferencia de resultados desde el campo del patrimonio a la biotecnología y medicina. La cervimycina es un complejo de varias sustancias de gran valor por su elevada actividad frente a estafilococos resistentes a otros antibióticos, así como a enterococos resistentes a la vancomycina [92].

Aparte del estudio de la biodiversidad, entre los objetivos a perseguir se encuentra el poder llegar a comprender la dinámica de colonización por parte de determinadas comunidades microbianas, de forma que pueda predecirse su efecto y abordar su control antes de que su crecimiento represente riesgos serios para la conservación de las pinturas y monumentos

estudiados. Naturalmente, este estudio ha de llevarse a cabo en colaboración con otros grupos de investigación, en el seno de un equipo multidisciplinar, que coordine los esfuerzos y confronten los diversos puntos de vista, donde tenga cabida no sólo la microbiología sino también la física, química y geología y cuyo resultado final se traduzca en la conservación de nuestro patrimonio.

7. AGRADECIMIENTOS

El grupo desea agradecer a la Junta de Andalucía, Consejerías de Cultura e Innovación, Ciencia y Empresa, así como al Ministerio de Cultura su decidido apoyo para el estudio de la conservación del Patrimonio. Otras investigaciones se han llevado a cabo mediante proyectos financiados por la Comisión Europea y el Ministerio de Educación y Ciencia. Este es un trabajo del proyecto CONSOLIDER CSD 2007-00058.

8. REFERENCIAS

- [1] Sáiz-Jiménez, C. (1982): Causas del deterioro de los murales de Daniel Vázquez Díaz, Monasterio de Santa María de la Rábida, Huelva. *Mundo Científico* 18: 1007-1011.
- [2] Saiz-Jimenez, C. y Samson, R.A. (1981): Microorganisms and environmental pollution as deteriorating agents of the frescoes of "Santa María de la Rábida", Huelva, Spain. En *6th Triennial Meeting ICOM, Committee for Conservation, Ottawa*, paper 81/15/5, 14 p.
- [3] Saiz-Jimenez, C. (1981): Weathering of building materials of the Giralda (Sevilla, Spain) by lichens. En *6th Triennial Meeting ICOM, Committee for Conservation, Ottawa*, paper 81/10/4, 9 p.
- [4] Casas Sicart, C. y Sáiz-Jiménez, C. (1982): Los briofitos de la catedral de Sevilla. *Collectanea Botánica* 13: 163-175.
- [5] Garcia-Rowe, J., Aparicio-Martinez, A. y Saiz-Jimenez, C. (1991): Weeds settling in Spanish cathedrals (Salamanca, Sevilla and Toledo). En N.S. Baer, C. Sabbioni y A.I. Sors (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*: 497-500. Oxford: C.E.C.-Butterworth-Heinemann.
- [6] Sáiz-Jiménez, C. (1988): Informe sobre la piedra y su tratamiento. En A. Jiménez y J.M. Cabeza "*Turris Fortissima*". *Documentos sobre la construcción, acrecentamiento y restauración de la Giralda*: 135-144. Sevilla: Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Sevilla.
- [7] Saiz-Jimenez, C., Ariño, X. y Ortega-Calvo, J.J. (1995): Mechanisms of stone biodeterioration by photosynthesis-based epilithic biofilms. In: Interactive physical weathering and bioreceptivity study on building stones, monitored by computerized X-ray tomography (CT) as a potential non-destructive research tool. En *Protection and Conservation of the European Cultural Heritage Research Report N° 2*: 25-62. Bruselas: European Commission, Directorate General XII.
- [8] Ortega-Calvo, J.J., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1991): Mechanical deterioration of building stones by cyanobacteria and algae. En H.W. Rossmore (ed.) *Biodeterioration and Biodegradation* 8: 392-394. Londres: Elsevier.
- [9] Ortega-Calvo, J.J., Ariño, X., Stal, L. y Saiz-Jimenez, C. (1994): Cyanobacterial sulfate accumulation from a historic building black crust. *Geomicrobiology Journal* 12: 15-22.
- [10] Saiz-Jimenez, C., Garcia-Rowe, J., Garcia del Cura, M.A., Roekens, E. y van Grieken, R. (1990): Endolithic cyanobacteria in Maastricht limestone. *The Science of the Total Environment* 94: 209-220.
- [11] Ortega-Calvo, J.J., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1991): Biodeterioration of building materials by cyanobacteria and algae. *International Biodeterioration* 28: 167-187.

- [12] Ortega-Calvo, J.J., Sanchez-Castillo, P.M., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1993): Isolation and characterization of epilithic chlorophyta and cyanobacteria from two Spanish cathedrals (Salamanca and Toledo). *Nova Hedwigia* 57: 239-253 .
- [13] Ortega-Calvo, J.J., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1993): Cyanobacteria and algae on historic buildings and monuments. En K.L. Garg, N. Garg y K.G. Mukerji (eds.) *Recent Advances in Biodeterioration and Biodegradation* vol 1: 173-203. Calcuta: Naya Prokash.
- [14] Saiz-Jimenez, C. (1994): Biodeterioration of stone in historic buildings and monuments. En G.C. Llewellyn, W.W. Dashek y C.E. O'Rear (eds.) *Biodeterioration Research 4: Mycotoxins, Wood Decay, Plant Stress, Biocorrosion, and General Biodeterioration*: 587-603. Nueva York: Plenum.
- [15] Ortega-Calvo, J.J., Ariño, X., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1995): Factors affecting the weathering and colonization of monuments by phototrophic microorganisms. *Science of the Total Environment* 167: 329-341.
- [16] Saiz-Jimenez, C. (2001): The biodeterioration of building materials. En J. Stoecker II (ed.) *A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion*, vol. 2: 4.1-4.20. Houston: NACE.
- [17] Bonazza, A., Sabbioni, C., Ghedini, N., Hermosin, B., Jurado, V., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2007): Did smoke from the Kuwait oil well fires affect Iranian archaeological heritage? *Environmental Science and Technology* 41: 2378 -2386.
- [18] Gomez-Bolea, A., Ariño, X., Balzarotti, R. y Saiz-Jimenez, C. (1999): Surface treatment of stones: consequences on lichenic colonisation. En *Of Microbes and Art. The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage*: 233-237. Florencia.
- [19] Ariño, X., Canals, A., Gómez-Bolea, A. y Saiz-Jimenez, C. (2002): Assessment of the performance of a two step water-repellent/biocide treatment after 8 years. En E. Galan y F. Zezza (eds.) *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*: 121-125. Lisse: Balkema Pub.
- [20] Saiz-Jimenez, C., Blanco-Varela, M.T., Urzi, C., Bock, E., Beech, I.B., Balzarotti, R. y Gomez-Bolea, A. (2002): Development of an innovative water repellent/biocide surface treatment for mortars: assessment of performance. En A. Brand-Grau y S. Perez-Vitoria (eds.) *4th European Commission Conference on Research for Protection, Conservation and Enhancement of Cultural Heritage: Opportunities for European Enterprises*: 112-117. Luxemburgo: European Commission.
- [21] Hernandez-Marine, M., Gonzalez-delValle, M.A., Ortiz-Martinez, A., Laiz, L., Saiz-Jimenez, C. (2003): Effect of Algophase on the cyanobacterium *Gloeotheca membranacea* CCAP 1430/3. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Molecular Biology and Cultural Heritage*, Balkema Pub., Lisse, pp. 195-200.
- [22] Urzi, C., Krumbein, W.E., Saiz-Jimenez, C., Pernice, A. y Ventimiglia, R. (1988): Heavy microbial colonisation and biodeterioration of frescoes of "Villa Romana del Casale", Piazza Armerina (EN). En A. Guarino y A. De Leo (eds.) *Proceeding of the 1st Int. Congr. on 'Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin'*, 1995, vol. II: 1235-1238. Palermo: CNR editions / Luxograph s.r.l.
- [23] Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Palomo, A., Ortega-Calvo, J.J. Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1994): Decay of Roman and repair mortars in mosaics from Italica, Spain. *Science of the Total Environment* 153: 123-131.
- [24] Puertas, F., Blanco, M.T., Palomo, A., Ortega-Calvo, J.J., Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1995): Characterization of mortars from the Italica mosaics: causes of deterioration. En *Fifth Conference of the International Committee for the Conservation of Mosaics, Conimbriga*: 197-202.
- [25] García-Rowe, J. y Sáiz-Jiménez, C. (1989): Colonización y alteración de mosaicos por líquenes y briofitos. En *I Coloquio Nacional de Conservación de Mosaicos*: 60-84. Palencia: Diputación de Palencia.
- [26] Saiz-Jimenez, C. (1990): The mosaics of Italica. *European Cultural Heritage, Newsletter on Research* 4: 34-38.

- [27] Saiz-Jimenez, C., Garcia-Rowe, J. y Rodriguez-Hidalgo, J.M. (1991): Biodeterioration of polychrome Roman mosaics. *International Biodeterioration* 28: 65-79.
- [28] Garcia del Cura, M.A., Hoyos, M. y Saiz-Jimenez, C. (1992): Petrographic characterization and weathering of limestone tesserae from mosaics of Italica. En D. Decrouez, J. Chamay y F. Zezza (eds.) *The Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*: 469-475. Ginebra: Museum d'Historie Naturelle.
- [29] Gil, J.A. y Saiz-Jimenez, C. (1992): Biodeterioration of Roman mosaics by bryophytes. En J. Delgado Rodrigues, F. Henriques y F. Telmo Jeremias (eds.) *7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 511-519. Lisboa: Laboratorio Nacional de Engenharia Civil.
- [30] Blanco-Varela, M.T., Menendez-Mendez, E. y Saiz-Jimenez, C. (1992): Vitreous tesserae from Italica's mosaics: SEM EDX characterization, *Electron Microscopy, vol 2: Material Sciences*: 783-784. Granada: EUREM 92.
- [31] Rodriguez-Hidalgo, J.M., Garcia-Rowe, J. y Saiz-Jimenez, C. (1994): Mosaicos de Italica: ejemplos de deterioro. En *Mosaicos nº 5, Conservacion in situ*: 293-303. Palencia: Excma. Diputacion Provincial.
- [32] Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1996): Colonization and deterioration processes in Roman mortars by cyanobacteria, algae and lichens. *Aerobiologia* 12: 9-18.
- [33] Puertas, F., Blanco-Varela, M.T., Palomo, A., Ariño, X., Hoyos, M. y Saiz-Jimenez, C. (1995): Causes and forms of decay of stuccos and concretes from the Roman city of Baelo Claudia (Southern Spain). En C.A. Brebbia y B. Leftheris (eds.) *Architectural Studies, Materials & Analysis, Computational Mechanics Publications, Structural Studies of Historical Buildings IV*, vol. 1: 171-178.
- [34] Sáiz-Jiménez, C. y Ariño, X. (1995): Colonización biológica y deterioro de morteros por organismos fotótrofos. *Materiales de Construcción* 45: 5-16.
- [35] Ariño, X., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (2002): Colonization of cryptoendolithic niches in Roman mortars by phototrophic microorganisms. En E. Galan y F. Zezza (eds.) *Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities*: 127-131. Lisse: Balkema Pub.
- [36] Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1996): A filamentous green alga from aquatic saline environment in mortars and stuccos from archaeological sites of southern Spain. En F. Zezza (ed.) *Origin, Mechanisms and Effects of Salts on Degradation of Monuments in Marine and Continental Environments, E.C. Protection and Conservation of the European Cultural Heritage Research Report nº 4*: 233-238. Bruselas: European Commission, Directorate General XII.
- [37] Ariño, X., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1996): *Ctenocladus circinnatus* (Chlorophyta) in stuccos from archaeological sites of southern Spain. *Phycologia* 35: 183-189.
- [38] Ariño, X., Hernández-Marine, M. y Sáiz-Jiménez, C. (1997): *Borzia perikleii* Anag. (Cyanoprokariota): A taxonomical approach. *Lagascalia* 19: 457-462.
- [39] Ariño, X., Ortega-Calvo, J.J., Gomez-Bolea, A. y Saiz-Jimenez, C. (1995): Lichen colonization of the Roman pavement of Baelo Claudia (Cádiz, Spain): biodeterioration vs bioprotection. *Science of the Total Environment* 167: 353-363.
- [40] Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1996): Lichen deterioration of consolidants used in the conservation of stone monuments. *The Lichenologist* 28: 391-394.
- [41] Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (2004): Lichens of different mortars at archaeological sites in Southern Spain: an overview. En L. St. Clair y M. Seaward (eds.) *Biodeterioration of Stone Surfaces*: 165-179. Kluwer Academic Publishers.
- [42] Ariño, X. y Saiz-Jimenez, C. (1997): Deterioration of the Elephant tomb (Necropolis of Carmona, Seville, Spain). *International Biodeterioration and Biodegradation* 40: 233-239.
- [43] Ariño, X., Hernandez-Marine, M. y Saiz-Jimenez, C. (1997): Colonization of Roman tombs by calcifying cyanobacteria. *Phycologia* 36: 366-373.

- [44] Piñar, G., Saiz-Jimenez, C., Schabereiter-Gurtner, C., Blanco-Varela, M.T., Lubitz, W. y Rölleke, S. (2001): Archaeal communities in two disparate deteriorated ancient wall paintings: detection, identification and temporal monitoring by DGGE. *FEMS Microbiology Ecology* 37: 45-54.
- [45] Akatova, E., Laiz, L., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Natural re-colonization of restored mural paintings. En R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras, C. Vazquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*, vol 1: 381-386. Londres: Taylor and Francis.
- [46] Albertano, P., Moscone, D., Palleschi, G., Hermosín Campos, B., Saiz-Jimenez, C., Sánchez-Moral, S., Hernández-Mariné, M., Urzi, C., Groth, I., Shroeckh, V., Saarela, M., Mattila-Sandholm, T., Gallon, J.R., Graziottin, F., Bisconti, F. y Giuliani, R. (2003): Cyanobacteria attack rocks (CATS): control and preventive strategies to avoid damage caused by cyanobacteria and associated microorganisms in Roman hypogean monuments. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 151-162. Lisse: Balkema Pub.
- [47] Sanchez-Moral, S., Luque, L., Cañaveras, J.C., Laiz, L., Jurado, V. y Saiz-Jimenez, C. (2004): Bioinduced barium precipitation in St Callixtus and Domitilla catacombs. *Annals of Microbiology* 54: 1-12.
- [48] Sanchez-Moral, S., Luque, L., Cuezva, S., Soler, V., Benavente, D., Laiz, L., González, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2005): Deterioration of building materials in Roman Catacombs: The influence of visitors. *Science of the Total Environment* 349: 260-276.
- [49] Zimmermann, J., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2005). Epilithic biofilms in Saint Callixtus Catacombs (Rome) harbour a broad spectrum of Acidobacteria. *Antonie van Leeuwenhoek* 89: 203-208.
- [50] Jurado, V., Groth, I., González, J.M., Laiz, L., Schuetze B. y Saiz-Jimenez, C. (2005): *Agromyces italicus*, sp. nov., *Agromyces humatus*, sp. nov., and *Agromyces lapidis*, sp. nov., isolated from Roman catacombs. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55: 871-875.
- [51] Jurado, V., L. Laiz, J.M. González, M.C. Portillo, M. Hernández-Marine y C. Saiz-Jimenez (2005): *Phyllobacterium catacumbae*, sp. nov., a *Rhizobiaceae* isolated from Roman catacombs. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55: 1487-1490.
- [52] Groth, I., Schumann, P., Schütze, B., Gonzalez, J.M., Laiz, L., Saiz-Jimenez, C. y Stackebrandt, E. (2005): *Isoptericola hypogeus* sp. nov., isolated from the Roman catacomb of Domitilla. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 55: 1715 -1719.
- [53] Roldan, M., Oliva, F., Gonzalez del Valle, M.A., Saiz-Jimenez, C. y Hernandez-Marine, M. (2006): Does green light influence the fluorescence properties and structure of phototrophic biofilms. *Applied and Environmental Microbiology* 72: 3026-3031.
- [54] Saiz-Jimenez, C. (2003): Organic pollutants in the built environment and their effect on the microorganisms. En P. Brimblecombe (ed.) *The Effects of Air Pollution on the Built Environment. Air Pollution Reviews* vol 2: 183-225. Londres: Imperial College Press.
- [55] Saiz-Jimenez, C., Brimblecombe, P., Camuffo, D., Lefevre, R.A. y van Grieken, R. (2004): Damages caused to European monuments by air pollution: assessment and preventive measures. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air Pollution and Cultural Heritage*: 91-109. Lisse: Balkema Pub.
- [56] Saiz-Jimenez, C. (2004): *Air Pollution and Cultural Heritage*. Lisse: A.A. Balkema.
- [57] Saiz-Jimenez, C. y Bernier, F. (1981): Gypsum crust on building stones. A scanning electron microscopy study. En *6th Triennial Meeting ICOM, Committee for Conservation*, paper 81/10/5 9 p.
- [58] Saiz-Jimenez, C. y Garcia del Cura, M.A. (1991): Sulfated crusts: a microscopic, inorganic and organic analysis. En N.S. Baer, C. Sabbioni y A.I. Sors (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*: 527-530. Oxford: C.E.C.-Butterworth-Heinemann.

- [59] Fobe, B.O., Vleugels, G.J., Roekens, E.J., van Grieken, R.E., Hermosin, B., Ortega-Calvo, J.J., Sanchez del Junco, A. y Saiz-Jimenez, C. (1995): Organic and inorganic compounds in limestone weathering crusts from cathedrals in Southern and Western Europe. *Environmental Science and Technology* 29: 1691-1701.
- [60] Saiz-Jimenez, C. (1991): Characterization of organic compounds in weathered stones. En N.S. Baer, C. Sabbioni y A.I. Sors (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*: 523-526. Oxford: C.E.C.-Butterworth-Heinemann.
- [61] Saiz-Jimenez, C. (1993): Deposition of airborne organic pollutants on historic buildings. *Atmospheric Environment* 27B: 77-85.
- [62] Saiz-Jimenez, C., Hermosin, B. y Ortega-Calvo, J.J. (1994): Pyrolysis/methylation: a microanalytical method for investigating polar organic compounds in cultural properties. *International Journal of Environmental and Analytical Chemistry* 56: 63-71.
- [63] Gaviño, M., Hermosin, H., Verges-Belmin, V., Nowik, W. y Saiz-Jimenez, C. (2004): The black crust composition from Saint Denis Basilica, France, as revealed by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Separation Science* 27: 513-523.
- [64] Cachier, H., Sarda-Estève, R., Oikonomou, K., Sciare, J., Bonazza, A., Sabbioni, C., Greco, M., Reyes, J., Hermosin, B. y Saiz-Jimenez, C. (2004): Aerosol characterization and sources in different European atmospheres: Paris, Seville, Florence and Milan. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air Pollution and Cultural Heritage*: 3-14. Lisse: Balkema.
- [65] Reyes, J., Hermosin, B. y Saiz-Jimenez, C. (2004): Organic analysis of aerosols in Seville atmosphere. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air Pollution and Cultural Heritage*: 15-20. Lisse: Balkema.
- [66] Gaviño, M., Hermosin, B., Vergés-Belmin, V., Nowik, W. y Saiz-Jimenez, C. (2002): The use of gas chromatography-mass spectrometry and pyrolysis techniques for assessing the nature of stone yellowing produced after laser cleaning. En R. Van Grieken, K. Janssens, L. Vant't dack y G. Meersman (eds.) *Proceedings 7th International Conference on Non-Destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural and Environmental Heritage, Antwerp, Belgium*: 1-8. Amberes: University of Antwerp.
- [67] Gaviño, M., Hermosin, B., Castillejo, M., Oujja, M., Rebollar, E., Verges-Belmain, V., Nowik, W. y Saiz-Jimenez, C. (2004): Black crust removal: the effect of stone yellowing and cleaning strategies. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air Pollution and Cultural Heritage*: 239-245. Lisse: Balkema.
- [68] Gaviño, M., Hermosin, B., Vergés-Belmin, V., Nowik, W. y Saiz-Jimenez, C. (2005): New insights on the chemical nature of stone yellowing produced after laser cleaning. En R. Van Grieken, y K. Janssens (eds.) *Cultural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-Destructive Testing and Micro-Analysis*: 149-157. Leiden: Balkema.
- [69] Saiz-Jimenez, C. y Hermosin, B. (1999): Thermochemolysis of the black deposits coating the ceiling and walls of Cueva del Encajero, Quesada, Spain. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 49: 349-357.
- [70] Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jimenez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rolleke, S. (2002): Phylogenetic 16S rRNA analysis reveals the presence of complex and partly unknown bacterial communities in Tito Bustillo cave, Spain, and on its Paleolithic paintings. *Environmental Microbiology* 4: 392-400.
- [71] Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jimenez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rolleke, S. (2004): Phylogenetic diversity of bacteria associated with Paleolithic paintings and surrounding rock walls in two Spanish caves (Llonin and La Garma). *FEMS Microbiology Ecology* 47: 235-247.
- [72] Groth, I. y Saiz-Jimenez, C. (1999): Actinomycetes in hypogean environments. *Geomicrobiology Journal* 16: 1-8.
- [73] Laiz, L., Groth, I., Gonzalez, I. y Saiz-Jimenez, C. (1999): Microbiological study of the dripping waters in Altamira cave (Santillana del Mar, Spain). *Journal of Microbiological Methods* 36: 129-138.

- [74] Saiz-Jimenez, C. y Hermosin, B. (1999): The nature of the organic matter present in dripping waters from Altamira cave. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 49: 337-347.
- [75] Saiz-Jimenez, C. (2005): The lessons of Lascaux. *Coalition* 10: 3.
- [76] Stomeo, F., Laiz, L., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Microbial diversity on paintings and engravings in Doña Trinidad Cave (Ardales, Spain). En R. Fort, M. Alvarez de Burgo, M. Gomez-Heras y C. Vazquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*, vol 1: 355-360. Londres: Taylor and Francis.
- [77] Groth, I., Vettermann, R., Schuetze, B., Schumann, P. y Saiz-Jimenez, C. (1999): Actinomycetes in karstic caves of Northern Spain (Altamira and Tito Bustillo). *Journal of Microbiological Methods* 36: 115-122.
- [78] Schabereiter-Gurtner, C., Saiz-Jimenez, C., Piñar, G., Lubitz, W. y Rolleke, S. (2002): Altamira cave paleolithic paintings harbour partly unknown bacterial communities. *FEMS Microbiological Letters* 211: 7-11.
- [79] Zimmermann, J., González, J.M., Saiz-Jimenez, C. y Ludwig, W. (2005): Detection and phylogenetic relationships of highly diverse uncultured acidobacterial community on paleolithic paintings in Altamira Cave using 23S rRNA sequence analyses. *Geomicrobiology Journal* 22: 379-388.
- [80] Gonzalez, J.M., Portillo, M.C. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Metabolically active Crenarchaeota in Altamira Cave. *Naturwissenschaften* 93: 42-45.
- [81] Portillo, M.C., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Diversity of sulfate-reducing bacteria as an example of the presence of anaerobic microbial communities in Altamira Cave (Spain). En R. Fort, M. Alvarez de Burgo, M. Gomez-Heras y C. Vazquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*, vol 1: 367-371. Londres: Taylor and Francis.
- [82] Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Soler, V., Saiz, C., Bedoya, J. y Lario, J. (2002): La Conservación del Monumento. En: J.A. Lasheras (ed.) *Redescubrir Altamira*: 245-257. Madrid: Turner.
- [83] Laiz, L., González, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2003): Microbial communities in caves: Ecology, physiology, and effects on paleolithic paintings. En R.J. Koestler, V.R. Koestler, A.E. Carola y F.E. Nieto-Fernandez (eds.) *Art, Biology, and Conservation: Biodeterioration of Works of Art*: 210-225. Nueva York: The Metropolitan Museum of Art.
- [84] Portillo, M.C., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2006): Metabolically active microbial communities of yellow and grey colonizations on the walls of Altamira Cave, Spain. *Journal of Applied Microbiology* 93: 42-45.
- [85] González, J.M., Ortiz-Martinez, A., Gonzalez-delValle, M.A., Laiz, L. y Saiz-Jimenez, C. (2003): An efficient strategy for screening large cloned libraries of amplified 16S rDNA sequences from complex environmental communities. *Journal of Microbiological Methods* 55: 459-463.
- [86] González, J.M., Zimmermann, J. y Saiz-Jimenez, C. (2005): Evaluating putative chimeric sequences from PCR amplified products and other cross-over events. *Bioinformatics* 21: 333-337.
- [87] González, J.M., Portillo, M.C. y Saiz-Jimenez, C. (2005): Multiple displacement amplification as a pre-PCR reaction to process difficult to amplify samples and low copy number sequences from natural environments. *Environmental Microbiology* 7: 1024-1028.
- [88] González, J.M. (2005): *Caracterización molecular de la diversidad específica y funcional de las Acidobacterias como un grupo bacteriano desconocido y altamente significativo en ambientes acuáticos*. Proyecto CGL2004-03927/BOS de Ministerio de Educación y Ciencia.
- [89] Herold, K., Xu, Z., Gollmick, F.A., Graefe, U. y Hertweck, C. (2004): Biosynthesis of cervimycin C, an aromatic polyketide antibiotic bearing an unusual dimethylmalonyl moiety. *Organic & Biomolecular Chemistry* 2: 2411-2414.

- [90] Laiz, L., Groth, I., Schumann, P., Zezza, F. Felske, A., Hermosin, B. y Saiz-Jimenez, C. (2000): Microbiology of the stalactites from Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italy. *International Microbiology* 3: 25-30.
- [91] Groth, I., Schumann, P., Laiz, L., Sanchez-Moral S., Cañaveras, J.C. y Saiz-Jimenez, C. (2001): Geomicrobiological study of the Grotta dei Cervi, Porto Badisco, Italy. *Geomicrobiology Journal* 18: 241-258.
- [92] Herold, K., Gollmick, F.A., Groth, I., Roth, M., Menzel, K.D., Möllmann, U., Gräfe, U. y Hertweck, C. (2005): Cervimycin A-D: a polyketide glycoside complex from a cave bacterium can defeat vancomycin resistance. *Chemistry - A European Journal* 11: 5523-5530.

LA PETROLOGÍA: UNA DISCIPLINA BÁSICA PARA EL AVANCE EN LA INVESTIGACIÓN Y CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO

R. Fort , M.A. García del Cura¹, M.J. Varas², A. Bernabéu², M. Álvarez de Buergo, D. Benavente³, C. Vázquez-Calvo, J. Martínez-Martínez³ y E. Pérez-Monserrat

**Instituto de Geología Económica
Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Universidad Complutense
José Antonio Nováis 2
28040 Madrid**

¹Laboratorio Petrología Aplicada Unidad Asociada (CSIC- UA)

²Departamento de Petrología y Geoquímica Facultad de Geología (UCM), 28040 Madrid

³Departamento de Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente (UA)

Resumen. El grupo de Petrología Aplicada al Patrimonio está constituido por investigadores del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, la Universidad Complutense de Madrid y la Universidad de Alicante. Su actividad investigadora se fundamenta principalmente en el análisis del deterioro de los materiales pétreos utilizados en el patrimonio arquitectónico y en las causas que lo genera, así como en la determinación de las técnicas de conservación y protección más adecuadas en función de las características petrofísicas y del entorno en que se encuentran los materiales. Para ello cuenta con el equipamiento analítico más idóneo para llevar a cabo la diagnosis del problema y así poder recomendar las actuaciones a realizar. La experiencia del grupo queda avalada por el cerca de centenar de edificios y monumentos en que han participado en los estudios previos para acometer los trabajos de conservación y restauración, así como en el asesoramiento continuado durante la ejecución de la obra. Su conocimiento sobre las técnicas de conservación de materiales y sus causas de deterioro ha permitido realizar prototipos y desarrollar patentes que están a disposición de las empresas del sector para acometer las tareas de conservación del patrimonio. Igualmente el grupo investigador realiza una faceta muy importante en la difusión del patrimonio con iniciativas innovadoras como es la creación de las Rutas Geomonumentales.

1. INTRODUCCIÓN A LA ACTIVIDAD DEL GRUPO

La investigación desarrollada por el grupo de Petrología Aplicada al Patrimonio (PAP) consiste en utilizar los conocimientos de la geología para llevar a cabo la conservación del patrimonio arquitectónico construido en piedra. Es uno de los primeros grupos de investigación en España que ha introducido las técnicas petrológicas tanto para conocer los tipos, las causas y los mecanismos de degradación, como proponer, desde su conocimiento, las técnicas de conservación más adecuadas para los materiales de construcción empleados, tanto en el patrimonio monumental, como en obra nueva.

La Petrología, como una disciplina de las Ciencias Geológicas, aporta desde sus distintas especialidades -petrografía, geoquímica, petrofísica, geocronología, etc.-, unos conocimientos que permiten caracterizar las rocas para, a continuación, poder establecer unas pautas de actuación en la conservación del patrimonio histórico y cultural construido con materiales pétreos. Toda actuación en la conservación de este patrimonio tiene que partir de un conocimiento profundo de las propiedades, tanto intrínsecas como extrínsecas de la piedra de construcción y de las causas de su deterioro. Este conocimiento adquirido, se debe transmitir al resto de los profesionales y técnicos que participan en las labores de conservación-restauración (arquitectos, historiadores, restauradores, químicos, físicos, biólogos, etc.), para poder establecer con rigor los criterios de restauración más idóneos para la conservación de la piedra. Una obra de restauración no fracasará, si el proyecto de restauración recoge todos los

conocimientos aportados por los diferentes especialistas que participan en distintos campos de actuación en una intervención de restauración.

Hoy en día no se discute la utilidad de los conocimientos petrológicos para abordar eficazmente las intervenciones de restauración de un bien patrimonial. Desde que se inicia el proyecto, con las distintas fases de estudios previos, durante la redacción del proyecto de restauración, a lo largo de la fase de ejecución de los trabajos de la intervención, y hasta en las distintas fases de mantenimiento del edificio una vez finalizada la obra, la aportación de los estudios petrológicos está presente y es muy significativa.

Uno de los objetivos que promueve este equipo de investigación es la caracterización y determinación de las causas del deterioro de los materiales y las técnicas de conservación y protección más adecuadas de los materiales pétreos de construcción utilizados en el patrimonio arquitectónico y monumental.

2. EVOLUCIÓN A LO LARGO DEL TIEMPO

El grupo de investigación inició sus actividades hace más de 30 años con el estudio de mosaicos y de yacimientos arqueológicos, siendo uno de los primeros grupos que introducía las técnicas petrológicas para conocer las causas de degradación y proponer desde un conocimiento integral las técnicas de conservación más adecuadas. Desde hace dos décadas su actividad se ha centrado principalmente en el patrimonio arquitectónico.

El grupo de investigación nació en el Departamento de Petrología y Geoquímica de la Universidad Complutense (UCM) y en el Instituto de Geología Económica, el cual es un Centro Mixto perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y a la Universidad Complutense de Madrid, teniendo como nombre el de Conservación del Patrimonio Arquitectónico. Los investigadores que iniciaron estas actividades fueron el Catedrático de la UCM, profesor Francisco Mingarro Martín y la Investigadora Científica Concepción López de Azcona Fraile. Los estudios que se realizan en esta primera etapa están dirigidos al análisis de mosaicos, materiales cerámicos y materiales pétreos existentes en yacimientos arqueológicos [1-3]. En los últimos 20 años la actividad se ha centrado principalmente en el estudio de las causas del deterioro y las técnicas de conservación de los materiales pétreos del patrimonio arquitectónico, sin olvidar el patrimonio geológico [4-7]. El proyecto: *Investigación científica y tecnológica de la degradación de los materiales de construcción de la Catedral de Toledo: alteración en clima continental*, financiado por la CICYT durante los años 1988-1992, permitió la consolidación del grupo en el estudio de la degradación de los materiales del patrimonio arquitectónico [8-12]. A partir de entonces la actividad en el estudio del patrimonio arquitectónico se fue incrementando, habiendo abordado desde entonces hasta la actualidad la investigación de más de 90 monumentos. En la Tabla 1 se muestra la distribución de los monumentos estudiados en las diferentes Comunidades Autónomas. Puede apreciarse que la principal actividad se desarrolla en la Comunidad de Madrid y en su entorno más próximo, pero se realizan también importantes actividades en otras Comunidades.

En la Tabla 2 se muestra la tipología de los monumentos estudiados, desarrollando actuaciones tanto en monumentos de propiedad eclesiástica (catedrales, monasterios, iglesias, etc.) como en monumentos y edificios pertenecientes a obras civiles o militares.

Si la Catedral de Toledo marcó un hito importante en la investigación del grupo, se puede decir que los estudios llevados a cabo en el Palacio Real de Madrid, permitieron su consolidación definitiva. Los estudios acometidos desde 1994 hasta el año 2002 permitieron abordar los trabajos de restauración de sus fachadas con un rigor científico durante las actuaciones de restauración realizadas entre 2003-2005 [13-15].

Tabla 1. Distribución por autonomías de los principales monumentos estudiados por el grupo investigación de Petrología Aplicada al Patrimonio.

Autonomía	Provincia	Nº	Total
Comunidad de Madrid	Madrid	36	36
Junta de Castilla-León	Soria	8	22
	Segovia	5	
	Burgos	3	
	Valladolid	3	
	Salamanca	1	
	Palencia León	1 1	
Comunidad Valenciana	Alicante Valencia	10 2	12
Junta de Castilla-La Mancha	Toledo Cuenca Guadalajara	5 2 1	8

Autonomía	Provincia	Nº	Total
Junta de Andalucía	Sevilla	3	5
	Granada Jaén	1 1	
Comunidad Foral de Navarra	Navarra	4	4
Gobierno de Cantabria	Cantabria	2	2
Junta de Extremadura	Cáceres	2	2
Principado de Asturias	Asturias	1	1
Junta de Galicia	Pontevedra	1	1
Gobierno de las Islas Baleares	Palma de Mallorca	1	1

Tabla 2. Tipología de los monumentos estudiados por el grupo investigación de Petrología Aplicada al Patrimonio

PATRIMONIO RELIGIOSO		PATRIMONIO CIVIL O MILITAR			
Tipología	nº	Tipología	nº	Tipología	nº
Catedrales	7	Palacios	11	Murallas	3
Monasterios	8	Museos	3	Castillos	3
Colegiatas	2	Edificios	9	Fuentes	2
Conventos	1	Puentes	5	Yacimientos Arqueológicos	11
Iglesias	8	Acueductos	2	Otros	10
Otros	4	Puertas	5		
Total	30				64

Además de estas dos actuaciones señaladas se pueden citar otros monumentos emblemáticos en los que se ha intervenido como las catedrales de Sigüenza, Valladolid, Cuenca y Santa M^a La Real de la Almudena de Madrid, Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Madrid), Monasterio de Uclés (Cuenca), Monasterio Santa María La Real de Nieva (Segovia), Real Monasterio de La Encarnación de Madrid, Colegiata de Santa Juliana en Santillana del Mar (Cantabria), Casco histórico de Ciudad Rodrigo (Salamanca), Acueducto de Segovia, Panteón de Hombres Ilustres (Madrid), Palacio de la Diputación Provincial de Alicante, Palacio de Riofrío (Segovia), Palacio de Gravina (Alicante), Palacio de D. Pedro I, en el Alcázar de Sevilla, Puerta de Alcalá (Madrid), Puente Viejo de Elche (Alicante), Museo Provincial de Bellas Artes (Alicante) y Ayuntamiento de Valencia, entre otros muchos [16-34].

La relación de monumentos indicados se refiere a aquellos en los que se ha realizado un estudio integral sobre la caracterización de materiales, estudio de las causas y mecanismos de su deterioro y las técnicas de conservación más adecuadas. No se citan otros muchos

monumentos en los que se ha estudiado una parte específica de sus materiales, como puede ser el estudio de las pátinas históricas, o aquellos otros en donde se ha determinado la formación geológica de procedencia de sus explotaciones o las canteras históricas.

Otro momento importante en la historia del grupo de investigación fue la creación en el año 2001 de la Unidad Asociada de Petrología Aplicada de la Universidad de Alicante con el CSIC, a través del Instituto de Geología Económica. Esto ha permitido complementar el equipamiento científico puesto a disposición de los miembros de ambas Instituciones. De esta forma, el Grupo de Investigación de Petrología Aplicada al Patrimonio dispone de dos laboratorios: Laboratorio de Petrofísica (LPF) perteneciente al Instituto de Geología Económica y el Laboratorio de Petrología Aplicada (LPA) de la Universidad de Alicante. La participación conjunta de estos dos laboratorios permite alcanzar un grado de competitividad elevado en dos campos de investigación complementarios como es el de la piedra de construcción en edificios de nueva construcción y el de la conservación de materiales pétreos del patrimonio.

El Laboratorio de Petrofísica pertenece a la Red de Laboratorios de la Comunidad de Madrid, siendo el único que proporciona un servicio integral sobre la conservación del patrimonio. El equipamiento del que dispone, conjuntamente con el del Laboratorio de Petrología Aplicada de la Unidad Asociada de la Universidad de Alicante, permite abordar la inmensa mayoría de los problemas relacionados con el deterioro y conservación de los materiales pétreos, tanto del patrimonio histórico y cultural, como del patrimonio geológico localizado en parques naturales.

La financiación de las investigaciones que se desarrollan se realiza tanto por medio de proyectos convocados por diferentes organismos de la administración pública de ámbito nacional (Ministerio de Educación y Ciencia, Ministerio de Fomento, etc.), como por las diferentes administraciones autonómicas y locales. También se realizan contratos y convenios de investigación con otros organismos de investigación, como es el IGME, Patrimonio Nacional, así como con instituciones religiosas, empresas de construcción y restauración, asociaciones y comunidades vecinales.

Es preciso indicar que el grupo actualmente desarrolla sus actividades de investigación principalmente dentro de dos grandes proyectos de investigación. El primero de ellos pertenece al IV PRICIT de la Comunidad de Madrid, para el período 2006-2009, que financia proyectos a grandes grupos de investigación de la Comunidad con el título *Durabilidad y conservación de materiales tradicionales naturales del patrimonio arquitectónico* (www.maternas.es), y el otro, financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia dentro del Programa CONSOLIDER-INGENIO 2007, con el título *Tecnologías para la conservación y revalorización del Patrimonio Cultural*, para el período 2008-2012.

Las líneas de investigación desarrolladas a lo largo de todos estos años han ido evolucionando en base a la experiencia adquirida por el equipo investigador, yendo desde la caracterización de materiales por técnicas tradicionales hacía la utilización de técnicas no destructivas y portátiles, desde tratamientos orgánicos sintéticos a tratamientos tradicionales para la conservación de los materiales.

3. PRINCIPALES CASOS ESTUDIADOS

La Petrología es de gran utilidad no sólo para la caracterización de los materiales, la determinación de la autenticidad de aquello que se quiere conservar y el establecimiento de la procedencia de los materiales, sino que también esclarece cuáles han sido las causas y mecanismos de su deterioro y los factores que han incidido en dichas causas. Todo ello es de

gran importancia para definir los criterios de actuación que han de quedar bien reflejados en los proyectos de restauración previos a cualquier intervención.

Las características petrológicas del material, y el ambiente en el que se encuentra, condicionan el deterioro de los materiales con los que está construido un monumento o pieza arqueológica. Por ello es importante tener un conocimiento integral del monumento o edificio antes del proceso de intervención.

Es imprescindible para ello realizar una completa y exhaustiva caracterización de los materiales, determinar las técnicas constructivas empleadas, conocer los efectos del entorno sobre el edificio y las incompatibilidades entre materiales, reconocer las técnicas de restauración anteriormente utilizadas, etc., todo ello utilizando las técnicas analíticas adecuadas. La utilización de técnicas tradicionales de caracterización, conjuntamente con técnicas no destructivas, permite el conocimiento más profundo del estado de conservación de los materiales, pudiendo de este modo establecer el grado y el alcance de la intervención a realizar en cada elemento patrimonial.

Conociendo las propiedades petrológicas, químicas y físicas de los materiales, el grado de deterioro que presentan, y determinando las causas de su deterioro, se podrán definir las actuaciones a realizar, proponiendo técnicas preventivas de conservación o la elección de las técnicas de limpieza o piedra de sustitución más adecuadas, así como determinar los métodos y productos de consolidación y protección para los materiales más idóneos. Todo ello debe encaminarse a evitar intervenciones incorrectas o muy nocivas, por desconocimiento de los diferentes componentes del patrimonio histórico y cultural, y carentes de una base científica.

Las líneas de investigación desarrolladas por este grupo, partiendo siempre de la caracterización de los materiales pétreos, son: evaluación del grado de deterioro y sus causas, evaluación de la durabilidad de materiales pétreos en base a sus propiedades petrofísicas, evaluación de los técnicas de conservación y protección de los materiales, utilización de técnicas no destructivas, desarrollo de nuevas técnicas de protección y creación de nuevas herramientas para la difusión y valorización del patrimonio.

A continuación se muestran algunos casos de estudio de cada una de las líneas indicadas, en los que se sintetizan las investigaciones más destacadas que muestran los logros y avances científicos alcanzados.

3.1. Efectos y causas del deterioro

Las causas de degradación engloban factores intrínsecos, propios del material de construcción utilizados, factores extrínsecos, relacionados con el ambiente y entorno en que se encuentra el monumento, y factores constructivos o arquitectónicos, dependientes de las características constructivas del edificio. Un cuarto factor es el antropológico, producido fundamentalmente por falta de educación cultural y medioambiental de la sociedad y que incide directamente en los otros factores indicados [35-37]. Las causas del deterioro del patrimonio histórico artístico son muy variadas e interactúan entre sí, lo que favorece un aumento rápido de su degradación (Figuras 1 y 2). Todo ello genera una serie de daños en la piedra que pueden afectar al conjunto del bien patrimonial, llegando a su ruina con el paso del tiempo. Los principales agentes de deterioro son el agua, la contaminación atmosférica, las sales y la actividad biológica. También el fuego es un agente de deterioro. Estos son los agentes más tradicionales de deterioro, aunque en la actualidad gana fuerza un nuevo agente que interacciona con los anteriores acelerando el proceso de deterioro: las restauraciones llevadas a cabo en el último siglo y sobre todo el empleo inadecuado de ciertas técnicas de restauración provocan fuertes incompatibilidades entre los materiales modernos y los originales del monumento [38, 39]. (Figura 2.1)

El grupo de investigación ha estudiado diferentes factores de deterioro sobre el patrimonio. Se pueden destacar los estudios llevados a cabo sobre los efectos de la contaminación atmosférica en el deterioro de los monumentos [40-43] (Figura 1.1 y 1.2). Las técnicas de prevención más adecuadas para la protección del patrimonio respecto a este factor han quedado reflejadas en los trabajos realizados en el entorno de Palacio Real de Madrid con la remodelación urbanística de su entorno con motivo de la construcción del paso subterráneo de Bailén [44].

La incidencia de la actividad biológica de las palomas en el deterioro de los monumentos ha sido recientemente una aportación científica importante que ha demostrado que los excrementos de estas aves son agentes muy dañinos sobre la piedra, no sólo por el cambio de acidez de la piedra y las manchas sobre las fachadas, sino porque constituyen una fuente de aporte de sales que favorecen la disgregación de los materiales [45]. También el biodeterioro generado por líquenes ha sido estudiado en diferentes monumentos de la Comunidad Valenciana [46, 47].

Las condiciones ambientales también pueden favorecer la fatiga del material, pues los intensos contrastes térmicos existentes en ciertas zonas, acompañados de un alto grado de insolación, pueden provocar dilataciones térmicas diferenciales entre los distintos materiales, y entre los distintos minerales que componen la piedra, debilitando su estructura interna. Estos efectos han quedado recogidos en trabajos muy diversos realizados en diferentes monumentos de la Comunidad de Madrid [48-50].

3.1.1. Los daños por cristalización de sales

Los periodos cíclicos de hidratación-deshidratación que sufren los materiales pétreos pueden ocasionar tensiones internas que se traducen en una fatiga del material y en su deterioro. Este efecto se agrava cuando en el agua existen ciertos iones en disolución, cuya precipitación genera la cristalización de compuestos salinos, bajo la superficie de la piedra o en su superficie, generando criptoeflorescencias y eflorescencias salinas. La investigación realizada sobre la cristalización de sales en materiales pétreos por la unidad asociada se centra principalmente en el estudio de durabilidad de materiales pétreos utilizados como material de construcción [51, 52]. Los resultados obtenidos han permitido profundizar en la relación entre la durabilidad de los materiales pétreos y sus propiedades petrográficas y petrofísicas, así como desarrollar modelos estadísticos multivariantes que permitan predecir su durabilidad. Ejemplos de aplicación son los realizados en el Monasterio de Bonaval [53], enmarcado en el Proyecto Maternas, en el que se muestra un claro ejemplo de incompatibilidad de materiales; el estudio realizado en edificios históricos en Adelaide, Australia, donde se evalúan distintos tratamientos para evitar las infiltraciones de aguas saladas; y el realizado en el Puente de Salintes, Novelda (Alicante) [54, 55]. Igualmente, también se han investigado nuevos tipos de ensayos que simulen mejor la alterabilidad por cristalización de sales [56].

En el Laboratorio de Petrofísica se ha mostrado la importancia de controlar los parámetros de simulación en los procesos de cristalización de sales, así como los efectos que producen ciertas sales en los monumentos [57-60] (Figura 2.2).

3.1.2. El fuego en el deterioro

La acción del fuego en el deterioro de los materiales es un aspecto importante ya que muchos bienes patrimoniales han sido afectados por incendios históricos, constituyendo un riesgo potencial de pérdida del patrimonio monumental. La acción COST C-17 financiada por la European Science Foundation (*Fire loss of historical buildings*) manifestó que casi cada día, un bien patrimonial es destruido por efecto del fuego. El conocimiento de los efectos sobre los materiales pétreos permitirá establecer cuales son los materiales más adecuados para ser utilizados en obras nuevas con efecto de minimizar este riesgo potencial. La utilización de técnicas microscópicas permite evaluar el grado e intensidad de

los efectos del fuego sobre el material pétreo. Los estudios realizados sobre materiales que han sufrido fuegos reales, y sobre todo a través de diferentes técnicas de simulación, principalmente por medio de técnicas láser, han permitido conocer el comportamiento y durabilidad de los materiales ante la acción del fuego [61, 62], orientados estos estudios hacia una conservación preventiva.

La respuesta a los efectos del fuego difieren de si la piedra de construcción es cristalina y compacta (granitos, mármoles, calizas o dolomías) o granular (areniscas o calizas fosilíferas). En las piedras granulares, el efecto del fuego se acentúa en su matriz, donde según la temperatura que se alcance pueden producirse transformaciones mineralógicas y químicas irreversibles. Son frecuentes los procesos de oxidación del hierro que contienen estas arcillas y que se traducen en cambios de color (hacia tonos rojizos) según en gradiente térmico alcanzado. En las piedras cristalinas, el efecto del fuego es fundamentalmente físico o mecánico, generándose una red de fisuras que afectan, bien a los contactos entre los diferentes minerales, o bien a la estructura interna del propio cristal (inter, intra y trans-granulares). De esta forma, tanto la matriz de las piedras granulares como las fisuras de las piedras cristalinas son analizadas principalmente mediante la combinación de diversas técnicas microscópicas: microscopía óptica de polarización, microscopía de fluorescencia y microscopía electrónica de barrido, apoyándose además en técnicas de análisis mineralógico y químico, y de tratamiento de imágenes (Figura 2.3). Igualmente utilizando técnicas petrofísicas se determinan los daños que se generan en la estructura de la piedra [63-66].

3.2. Durabilidad de los materiales

El estudio de la durabilidad de los materiales de construcción ha promovido la necesidad de desarrollar herramientas específicas para poder modelizar el comportamiento de los materiales en condiciones medioambientales agresivas, con procesos de cristalización de sales, acción de la insolación, variaciones térmicas, etc., aspecto muy importante para la selección de rocas ornamentales en obras nuevas, todo ello en base al conocimiento de las características petrofísicas de los materiales [56, 67-70]. Dentro de estas investigaciones se ha desarrollado un prototipo de cámara que ha sido patentado (*Cámara automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación. Patente nº: 200201376*) [71].

Aunque se sabe de la importancia que tiene la anisotropía del material en el deterioro de la piedra, este parámetro no se tiene en cuenta al diseñar los ensayos de envejecimiento acelerado. La inclusión de este parámetro en los estudios de durabilidad de la piedra es de gran importancia, y por medio de técnicas no destructivas (ultrasonidos) y del apoyo de técnicas estadísticas (análisis clúster), se han podido establecer unos índices de calidad de la piedra natural a la hora de ser utilizada tanto en las obras de restauración como en obra nueva [58].

3.3. Selección de materiales pétreos

Una de las intervenciones importantes, en la restauración del patrimonio arquitectónico, es la selección del material más adecuado para la restitución de elementos pétreos muy deteriorados que afecten a la integridad estructural del monumento. Igualmente es muy importante realizar una adecuada selección de materiales para la puesta en valor de cascos históricos en donde es necesario preservar todo el entorno del conjunto (72). Para la selección de estos materiales es necesario conocer el uso y el medio ambiente al que van a estar sometidos. Para ello es necesario tener conocimiento de las características petrológicas de los materiales (73-78).

3.3.1. Piedra de sillería o roca ornamental

Para una adecuada intervención en un monumento o edificio es importante conocer las áreas de donde se abasteció de material para su construcción [6, 18-19, 79-83]. La localización de las canteras históricas es de gran interés no solo por su aportación al conocimiento histórico, socio-económico e industrial de la tecnología aplicada para la explotación, sino que permite la

obtención de material de la misma y similar formación geológica con el que se pueda evaluar el grado de deterioro de los materiales existentes en el monumento. También las muestras de canteras envejecidas pueden ser de utilidad para llevar a cabo los ensayos necesarios para seleccionar los tratamientos de consolidación e hidrofugación más adecuados. Pero la utilidad principal de la localización de la formación geológica y de las canteras históricas de las que se abasteció el monumento, es la de poder utilizar estos mismos recursos geológicos para obtener la materia prima de la piedra de sustitución a utilizar en las labores de restauración [72, 84]. Sin embargo, el material seleccionado tiene que cumplir unos requisitos mínimos de idoneidad, compatibilidad y durabilidad [72].

El grupo de investigación ha desarrollado una metodología de utilización de técnicas petrológicas y geoquímicas que permite definir el tipo de materiales y sus características, las cuales, sobre la base de la geología regional del entorno, facilitan la localización de la formación geológica de la que se extrajeron los sillares de un monumento, e incluso de las canteras históricas, siempre con el apoyo de los antecedentes históricos. Igualmente se ha realizado una valoración, en base a los criterios de idoneidad, compatibilidad y durabilidad, para establecer el tipo de piedra más adecuado a las condiciones específicas en que se va colocar en una obra determinada (Figura 1.3). Así, los parámetros de cromatismo, porosidad, distribución de tamaños de poros, capacidad de saturación de agua, absorción de agua libre y de agua capilar, procesos de evaporación de agua, comportamiento mecánico y de resistencia a diferentes agentes de deterioro, facilitan la selección de la piedra de sustitución más adecuada [18, 72].

3.3.2. Pavimentación de zonas de interés cultural: Cascos antiguos

Los materiales pétreos son el material de construcción idóneo para pavimentación de centros históricos de las ciudades, tanto por su durabilidad como por la armonización con los materiales del entorno. Pero para su selección hay que tener en cuenta, no sólo las propiedades intrínsecas del material (absorción de agua, resistencia mecánica, etc.), sino también las que van ligadas a su acabado, como son el deslizamiento y el desgaste. Por ello se han estudiado materiales empleados históricamente en cascos históricos urbanos [85-89] (Figura 1.4).

También se han estudiado las características de los materiales con vistas a su utilización en baldosas. Las características de las baldosas de granito han sido comparadas con las de otros materiales actualmente en uso, como las calizas, que también son aptas para pavimentación exterior, siempre que se utilice un grosor adecuado en función de su resistencia a la flexión. Para este estudio se ha utilizado la actual normativa europea. El acabado debe presentar una suficiente resistencia al deslizamiento y al desgaste en función de los requerimientos necesarios para las prestaciones que debe realizar (tráfico peatonal, tráfico rodado de baja o alta intensidad, situación en llano o en rampa, etc.). Los acabados pulidos no deben utilizarse por sus bajos valores de resistencia al deslizamiento. El acabado abujardado tanto en calizas como en granitos, es el más apto para pavimentación de exteriores. El acabado flameado en granitos también presenta muy buenas características para dicho fin. En calizas, los acabados flameado y amolado presentan buenos valores de resistencia al deslizamiento, pero hay que tener en cuenta que el acabado flameado provoca la disminución de la resistencia a flexión de la roca por lo que se precisan mayores espesores de baldosa para obtener resultados satisfactorios [89].

3.4. Efectividad e idoneidad de tratamientos de protección de monumentos

El uso de algunos de los tratamientos de protección y consolidación en la segunda mitad del siglo XX, está suponiendo en la actualidad un grave problema, pues no siempre han proporcionado el resultado adecuado, e incluso han incrementado el proceso de deterioro, ya que no eran idóneos para el tipo de piedra sobre el que se aplicó, generando una incompatibilidad que produce daños sobre el soporte que se quiere conservar y proteger [37, 38] (Figuras 1.5 y 2.1). Además, estos tratamientos han reaccionado y evolucionado de tal

modo que se han transformado en tratamientos irreversibles. La búsqueda de técnicas de eliminación de estos tratamientos sin causar daños añadidos a los materiales afectados supone en la actualidad un reto científico importante (Figura 1.6). Hay que destacar los estudios recientes de la utilización del láser en la eliminación de tratamientos de protección no adecuados sobre la piedra [69].

Para evitar los problemas de incompatibilidad de los tratamientos sobre los diferentes tipos de piedra se han desarrollado técnicas de valoración de la efectividad e idoneidad de los tratamientos de protección en los monumentos y de las técnicas de limpieza de sus fachadas, por medio de una metodología sencilla y rápida, que permite realizar una selección del tratamiento más adecuado a las características petrofísicas de los materiales a conservar [16, 17, 19, 28, 90-96]. Igualmente se pueden destacar los trabajos específicos de utilización de técnicas microscópicas para el estudio de los tratamientos de protección de la piedra [97, 98].

3.5. Utilización-validación de técnicas no destructivas

El desarrollo de técnicas analíticas no destructivas (TND) que permitan la realización de ensayos en muestras de valor histórico artístico proporciona unos resultados óptimos (Figura 2.4). Es necesario en cualquier caso, validar el empleo de este tipo de técnicas para poder asegurar que los resultados obtenidos sean lo suficientemente buenos para poder alcanzar una interpretación adecuada.

3.5.1. Técnica de propagación de ultrasonidos aplicados al patrimonio

La medida de la velocidad de propagación de los ultrasonidos, como técnica no destructiva aplicada a la caracterización de patrimonio histórico, constituye una herramienta altamente eficaz debido a las nulas repercusiones sobre el elemento estudiado. Además, eligiendo determinadas frecuencias de ultrasonidos, se pueden analizar espesores de material mucho más elevados que los alcanzados por otros métodos no destructivos, así como grados de resolución y detalle muy elevados. Respecto al proceso de obtención de resultados, subrayar su rapidez y sencillez, y, aunque la aplicación de esta técnica es idónea para la caracterización de materiales pétreos, no sólo se limita a ellos sino que también se puede emplear en el estudio de morteros, materiales cerámicos, metalúrgicos, etc. [99]. Una ventaja del uso de los ultrasonidos en el patrimonio recae en la posibilidad de aplicarlos de tres formas diferentes en función de la accesibilidad del punto estudiado y de la información que se desee obtener.

Existen varios modos de aplicación. La *transmisión-recepción* emplea dos transductores diferentes, uno que actúa como emisor de ondas y otro como receptor. Los resultados obtenidos hasta la fecha por el grupo de investigación son muy satisfactorios, ya que se han utilizado para determinar el grado de deterioro de los materiales, así como la localización de fisuras y fracturas, permitiendo establecer las pautas de intervención futuras en los monumentos [30, 100-104] (Figura 2.5). También esta técnica permite establecer la evolución futura de los materiales ante los procesos de envejecimiento y establecer su vida media [105]. El *pulso-eco* emplea un único transductor que actúa tanto de emisor como de receptor. La aplicación de esta técnica en el patrimonio es extensa, ya que en la mayoría de casos no es posible acceder a dos caras paralelas de un elemento constructivo, y es, junto con la *transmisión-recepción*, el modo más empleado en patrimonio [106, 107]. Esta técnica está siendo utilizada con buenos resultados en la evaluación de la alteración experimental de diferentes rocas de construcción [108]. Otra técnica que ha sido testificada ha sido la técnica de *impacto-eco*, en la que la onda incidente se genera mediante un impacto mecánico en lugar del transductor emisor y es registrada por un transductor receptor. Los resultados obtenidos hasta ahora por el grupo de investigación con esta técnica han presentado, sin embargo, gran dispersión.

Cabe señalar por último, que en la mayoría de los casos de estudio únicamente se trabaja con la velocidad de propagación de las ondas P (v_p); sin embargo los trabajos realizados demuestran que en multitud de ocasiones, la información aportada por v_p no es suficiente y es necesario realizar el tratamiento digital de la señal, tanto en el dominio temporal como en el de la frecuencia, para obtener parámetros más discriminatorios [102, 103].

3.5.2. Técnicas LIBS y EDXRF

La técnica de espectroscopía de ruptura inducida por láser (Laser Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) es una técnica analítica relativamente nueva, con alrededor de 30 años de existencia, y ciertamente emergente en el campo del patrimonio cultural [109-113]. Se trata de una técnica espectroscópica de emisión atómica que es rápida y eficaz para el análisis de materiales geológicos. Esta técnica presenta las características de ser aplicable *in situ*, no necesitar preparación de la muestra, ser mínimamente destructiva y aportar información sobre la composición elemental de la muestra de forma cualitativa y semicuantitativa. El equipamiento que el grupo ha utilizado es el existente en el Laboratorio IESL-FORTH (Creta, Grecia).

Por otra parte existe otra técnica portátil, que al contrario que el LIBS, sí permite distinguir la mayoría de los elementos químicos en un solo espectro, aunque su mayor inconveniente radica en la detección de elementos con un número atómico bajo. Se trata de la técnica portátil de espectrometría de fluorescencia de rayos X por energía dispersiva (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence, EDXRF). Es una técnica de espectrometría atómica no destructiva, ya que no requiere preparación de la muestra ni la modifica durante su análisis. El hecho de que el equipo sea portátil permite el análisis *in situ*, lo que es de suma importancia en este tipo de materiales ya que proporciona un análisis de tipo elemental evitando la toma de muestras. Con esta técnica se pueden efectuar tantos análisis cualitativos como cuantitativos. Esta técnica, que ha sido ya utilizada con éxito en el análisis de pigmentos en escultura [114], también se ha empleado para el análisis de partículas contaminantes en fachadas [115] y en el estudio de pátinas históricas del patrimonio arquitectónico [116]. El equipo que el grupo ha utilizado para la caracterización de pátinas ha sido el existente en el Centro Nacional de Aceleradores de Sevilla.

De las dos técnicas utilizadas para el análisis de las pátinas *in situ*, la fluorescencia de rayos X por energía dispersiva permitió la detección de un rango de elementos mayor, aunque la técnica LIBS permite la detección del P, elemento importante en el estudio de pátinas históricas, que supone una desventaja en EDXRF, ya que al tener las muestras gran cantidad de Ca los picos de escape interfieren con los picos de emisión del P. Existen otras ventajas a reseñar de ambas técnicas: mientras que el análisis mediante EDXRF permite determinar elementos como Sr, Zn, Cu, Ti y Pb, que se encuentran en bajas proporciones, la técnica LIBS permite realizar análisis en profundidad -microestratigráficos-, pudiendo analizar de este modo diferentes capas.

3.6. Desarrollo de nuevas técnicas de protección

3.6.1. Tratamientos de tipo inorgánico para la mejora de calidad de materiales pétreos

La mejora de calidad de rocas ornamentales porosas de forma previa a su comercialización, tiene una gran importancia para la prevención de su degradación. Esta mejora de calidad se produce por la formación de fases inorgánicas insolubles en el interior del sistema poroso.

Se ha seleccionado el carbonato cálcico como fase cementante, debido a su analogía composicional con el propio cemento mayoritario de los materiales porosos sobre los que se ha empleado esta metodología. El tratamiento consiste en la formación de carbonato cálcico a partir de una disolución de hidróxido cálcico en atmósfera de CO_2 , estudiando las variables que influyen en el proceso: concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y pH de la disolución, temperatura, humedad, tiempo y pCO_2 . Otra metodología estudiada ha sido la carbonatación acelerada de disoluciones en el interior del sistema poroso para formar los correspondientes

carbonatos en cada caso y cementar parte de los poros del material. Se han seleccionado distintas disoluciones: $\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Ba}(\text{OH})_2$, MgO y $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)$ (acetato de calcio), en diferentes condiciones de carbonatación [117, 118].

Además de este tipo de tratamientos se ha estudiado la aplicación de un proceso electroquímico para este fin. Se basa en la utilización del material pétreo como separador de compartimentos de un reactor electroquímico. Al circular corriente eléctrica por el sistema, los iones presentes en las disoluciones de anolito y catolito, se mueven bajo la acción del campo eléctrico. Escogiendo adecuadamente estas disoluciones, se induce la precipitación cementante de una fase insoluble en su interior [119, 120].

Una de las fases insolubles que ha demostrado ser más adecuada para el fin perseguido ha sido el fosfato de bario, debido a su insolubilidad en el rango de pH de trabajo. Los resultados obtenidos muestran que el fosfato de bario, precipita únicamente en una pequeña zona de la sección del material cerca de la superficie (2,5 mm desde la superficie externa), lo que conlleva que la mejora de las propiedades esté inicialmente limitada a dicha zona. En esta zona se produce una reducción importante de la porosidad accesible lo que influye en el comportamiento hídrico de la roca tratada.

3.6.1. Reproducción de pátinas de protección

La historia de la piedra como material de construcción ha estado muy ligada al uso de recubrimientos o cubiertas de acabado. Uno de estos recubrimientos son las pátinas o películas históricas, cuya técnica de elaboración se ha ido perdiendo paulatinamente, y que han sido estudiadas principalmente en monumentos de Italia, Grecia, y más recientemente, en España [121-123].

En los últimos años han existido intentos de reproducir las pátinas o de averiguar de qué manera los aditivos orgánicos -aspecto más peculiar de este tipo de recubrimientos- influyen en las propiedades de éstas. Se ha investigado acerca de tratamientos basados en antiguas recetas con ingredientes a base de leche, cal, caseína, aceite de linaza, albúmina, azúcar, etc., así como oxalato de calcio artificial que ha proporcionado buenos resultados a corto y medio plazo [124, 125].

La reproducción de oxalatos de calcio para proteger la piedra es algo que ya se ha logrado, pero la innovación sería conseguir la reproducción de fosfatos de calcio, compuestos que aparecen con frecuencia en muchas de estas pátinas. Así pues, los objetivos de una de las investigaciones llevadas a cabo por el grupo fueron conseguir la reproducción de la técnica con la que se elaboraron las pátinas históricas con una triple finalidad: la recuperación de la técnica tradicional, su empleo en futuras restauraciones y su aplicación como elemento estético y/o protector en futuras construcciones que utilicen piedra.

En base a los datos procedentes del análisis de pátinas históricas y a la búsqueda bibliográfica se elaboraron alrededor de 30 mezclas de recubrimiento utilizando diversos componentes, como distintos tipo de leche, cal, aceite de linaza, huevos, ocre, etc. Las mezclas de recubrimiento elaboradas se aplicaron sobre probetas de caliza. Se evaluaron sus características, efectividad y durabilidad tras haber sido expuestas durante un año a la intemperie.

Como resultado se obtuvieron algunas mezclas de recubrimiento que presentaban características similares a las pátinas históricas (Figura 2.6). Se procedió a solicitar la patente de invención correspondiente en la Oficina Española de Patentes y Marcas con el número de registro P200702293 y el título: *Procedimiento de preparación de pátinas o películas para superficies pétreas y sus aplicaciones*, de la mezcla de recubrimiento de la que se obtuvo mejores resultados de efectividad y durabilidad.

3.7. Nuevas herramientas de valorización del patrimonio: Rutas Geomonumentales

Las Rutas Geomonumentales suponen una metodología novedosa para la difusión del patrimonio arquitectónico, basada en los materiales geológicos que lo configuran [126-128]. La importancia del prefijo geo- reside principalmente en la fuerte influencia del paisaje para la localización y desarrollo de los asentamientos urbanos, así como en la relación entre las poblaciones y la geología, en tanto que tradicionalmente el hombre ha extraído los recursos geológicos más próximos para erigir sus construcciones.

Estas rutas compaginan las ciencias humanas y sociales con las ciencias geológicas y acercan a la sociedad a unos conocimientos que aumentan la valorización de su patrimonio y con ello promueve su conservación. Las Rutas Geomonumentales dan a conocer esta disciplina, mostrando cómo son los materiales geológicos, de donde proceden, cómo se degradan y cómo se comportan ante las diversas actuaciones de restauración acometidas en los mismos. Mediante la petrología, estas Rutas enseñan el lenguaje de los materiales geológicos, necesario conocer para motivar el aprecio y conservación del patrimonio arquitectónico. En definitiva se trata de añadir el valor geológico, no considerado hasta el momento, al patrimonio arquitectónico y monumental.

El papel fundamental de los materiales geológicos en el legado arquitectónico les configura como un importante valor patrimonial en sí, cuyo conocimiento petrológico supone una manera más de conservar y difundir el patrimonio arquitectónico.

En la aproximación de la ciencia a la sociedad, resulta esencial difundir parte de nuestra actividad investigadora, jugando las Rutas Geomonumentales un importantísimo papel en dicha tarea de difusión. Una de las vías para acercar dichas rutas a la sociedad, es a través de las páginas Web que permiten realizar la ruta de una forma virtual [126].

4. PERSPECTIVAS FUTURAS

La estrategia de investigación del grupo de investigación tiene que continuar con el enfoque dado ya que ha demostrado una alta aceptación científica, pero es necesario potenciar aspectos concretos que tienen que dirigirse hacia el uso de nuevas técnicas y productos con un enfoque de sostenibilidad que la sociedad demanda. Esto es un reto en este campo de actuación en donde se entremezclan los nuevos productos y las soluciones adaptadas a las necesidades del desarrollo sostenible, en donde es necesario implicar no solo a las administraciones públicas sino también al sector empresarial, para que entre todos utilicemos adecuadamente los métodos para llevar a cabo intervenciones de protección y valorización del patrimonio. Hay que tener presente que la tendencia actual en el campo de la conservación de materiales pétreos se está orientando desde una conservación interventiva o correctiva hacia una conservación preventiva. Por todo ello la investigación se tiene que dirigir hacia:

- 1- El conocimiento de los mecanismos de degradación de los materiales de construcción orientados a la conservación del patrimonio histórico, sobre todo en ambientes agresivos. Hay que potenciar la experimentación a escala real y acelerada para comprobar la respuesta de los materiales con diseño de monitorización para establecer el comportamiento temporal y la durabilidad de estos materiales en dichas condiciones.
- 2- Es necesario detectar y predecir los riesgos y amenazas futuras en el deterioro y conservación del patrimonio ante el posible cambio climático.
- 3- Identificación de nuevos parámetros que permitan valorar el estado de degradación de los materiales, utilizando para ello técnicas no destructivas y portátiles. Así, el empleo de tratamiento digital de la señal ultrasónica en el dominio frecuencial; y el desarrollo de otras técnicas no destructivas (conductividad eléctrica, termografía de infrarrojos, etc.)

en el patrimonio y evaluación de su efectividad así como realizar la intercomparación de resultados obtenidos con diferentes técnicas.

- 4- La aplicación de nuevos materiales, donde la valoración de su eficacia, idoneidad y durabilidad son aspectos que es necesario resaltar. Es necesario profundizar en el conocimiento del proceso de polimerización y su evolución en el tiempo al aplicar productos consolidantes e hidrofugantes, utilizando técnicas adoptadas de otras disciplinas que están demostrando su viabilidad en la conservación de materiales pétreos. Al igual que urgente el desarrollo de técnicas de eliminación de tratamientos inadecuados aplicados en el pasado.
- 5- No se puede olvidar la recuperación de técnicas tradicionales de conservación como son las pátinas. Es preciso profundizar en algunos aspectos, como la identificación de la fracción orgánica añadida y transformada, la posible contribución biológica en la evolución y transformación de estos recubrimientos, así como el análisis detallado del efecto protector que ejercen en los materiales pétreos sobre los que se aplican.
- 6- Se considera primordial la colaboración con otros grupos de investigación, la transferencia tecnológica de los conocimientos adquiridos hacia el sector industrial, y la innovación de técnicas, métodos y metodologías.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo recopilatorio de las investigaciones que está desarrollando el Grupo de Investigación de Petrología Aplicada al Patrimonio ha sido posible gracias a Francisco Mingarro Martín y M^a Concepción López de Azcona, precursores de este grupo. Nuestro agradecimiento a los diferentes organismos que han financiado las investigaciones a través de los proyectos, convenios y contratos de investigación, cuya lista sería interminable. Igualmente agradecemos a los organismos que han financiado los contratos y becas de investigación de los investigadores del grupo a través del Programa Ramón y Cajal, FPU, contratos I3P del CSIC, becas postdoctorales de la Comunidad de Madrid, etc.

6. REFERENCIAS

[1] Mingarro, M. y López de Azcona, M.C. (1985): Petrología arqueológica de algunos mosaicos del museo de Navarra. En J.M. Blázquez y M.A. Mezcúriz (eds.) *Mosaicos Romanos de Navarra*: 85-111. Madrid: Instituto Español de Arqueología.

[2] Mingarro, M. y López de Azcona, M.C. (1985): Estudio petrológico de teselas para la conservación de mosaicos. En *Mosaicos IV. Conservación in situ*: 107-134. Soria: Servicio de Investigaciones Arqueológicas.

[3] Mingarro, M., Avello, J.L., Amorós, J.L. y López de Azcona, M.C. (1986): *La villa romana de Campo de Villavidel (León). Arqueología, simetría, color y petrografía de mosaicos*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid / Universidad de León.

[4] García del Cura, M.A., González Martín, J.A. y Ordóñez, S. (1999): Conservation of an active fluvial tufa barrage system: Ruidera Lakes Natural Park (Castilla-La Mancha, Spain). En: D. Baretino, M. Vallejo y E. Gallego (eds.) *Towards the Balanced Management and Conservation of the Geological Heritage in the New Millenium*: 275-281. Madrid: Sociedad Geológica de España.

[5] Sancho Marcen, C., Belmonte, A., Arenas, C., Ascaso, C., Bastida, J., Fort, R., Longares, L.A., Luzon, A., Peña, J.L., Sopena, M.C., Sousa, V. y Wierzchos, J. (2000): *Bases geológicas, geomorfológicas, paisajísticas y arqueológicas para el aprovechamiento cultural de la Plana de Mobache y los Torrollones de Gabarda (Monegros, Huesca)*. Zaragoza: Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón. Serie Investigación 24.

- [6] Menduñía J., García del Cura, M.A., Fort R. y Fernández-Revuelta, B. (2003): Las canteras cretácicas de caliza y dolomías de la Comunidad de Madrid. Un Patrimonio Minero de interés cultural. En I. Rábano, I. Manteca y C. García (eds.) *Patrimonio geológico y minero y desarrollo regional*. Cuadernos del Museo Geominero 2: 235-241. Madrid: IGME.
- [7] López de Azcona, M.C., Mingarro, F., García del Cura, M.A., Ordóñez, S., Calvo, J.P., Fort, R., Bustillo, M., Peinado, M. y Alonso, A. (1991): Degradation of building materials of the Toledo Cathedral (Spain). En N.S. Baer, C. Sabbioni y A.I. Sors (eds.) *European Science Technology and European Cultural Heritage*: 925-929. European Commission / Butterworth-Heinemann.
- [8] Fort, R., Bustillo, M., Mingarro, F. y López de Azcona, M.C. (1992): Degradación de las rocas carbonáticas utilizadas en la construcción de la Catedral de Toledo: Aspectos Geoquímicos. En *Simpósios: III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Tomo 1: 225-234. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- [9] Fort, R., Bustillo, M., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (1992): Tendencias geoquímicas durante el proceso de alteración de los granitos de la Catedral de Toledo. *Boletín Geológico y Minero* 103: 136-147.
- [10] Mingarro, F., López de Azcona, M.C., García del Cura, M.A., Ordóñez, S., Calvo, J.P., Fort, R., Bustillo, M. y Alonso Zarza, A. (1992): Estudios realizados en la Catedral de Toledo con vistas a su restauración y a la consolidación de sus materiales pétreos. En *I Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*. Tomo I: 306-309. UNESCO.
- [11] La Iglesia, A., García del Cura, M.A. y Ordóñez, S. (1994): The physicochemical weathering of monumental dolostones, granites and limestones; dimension stones of the Cathedral of Toledo (Spain). *The Science of the Total Environment* 152: 179-188.
- [12] Fort, R., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (1995): Petrophysical properties of the stony materials of the bell tower of the Toledo Cathedral (Spain). En L. Aires Barros (ed.) *A Pedra Natural*: 315-323. Lisboa: Feira Internacional de Lisboa.
- [13] Fort, R., Mingarro, F. y López de Azcona, M.C. (1996): Petrología de los materiales de construcción del Palacio Real de Madrid. *Geogaceta* 20: 1236-1239.
- [14] Fort, R., López de Azcona, M.C., Mingarro, F., Álvarez de Buergo, M. y Rodríguez, J. (2000): A comparative study of the efficiency of siloxanes, methacrylates and microwax-based treatments applied to the stone materials of the Royal Palace of Madrid, Spain. En V. Fassina (ed.) *9th International congress on deterioration and conservation of stone*. Vol 2: 235-243. Amsterdam: Elsevier.
- [15] Fort, R., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (2002): Assessment of protective treatments based on their chromatic evolution: Limestone and granite in the Royal Palace of Madrid, Spain. En E. Galán y F. Zezza (eds.) *Protection and conservation of the cultural heritage of Mediterranean cities*: 437-441. Lisse: Balkema.
- [16] Fort, R., Mingarro, F., Rodríguez, J. y López de Azcona, M.C. (1999): Las areniscas de la Catedral de Sigüenza (Guadalajara): estudio petrológico. *Geogaceta* 25: 75-77.
- [17] Fort, R., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (2000): Limpieza de los materiales pétreos de la Catedral de Valladolid (España). *Materiales de Construcción* 50 (258): 37-50.
- [18] Fort, R., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (1998): Sustitución de elementos arquitectónicos en el Claustro de la Catedral de Cuenca (España): Selección de materiales pétreos. En *Actas del IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*: 177-179. Centro Internacional para la conservación del Patrimonio.
- [19] Gómez-Heras, M. y Fort, R. (2004): Localización de canteras no tradicionales en la arquitectura de Madrid: la cripta de la Catedral de Santa María la Real de la Almudena. *Materiales de Construcción* 54 (274): 33-49.

- [20] Mingarro, F., López de Azcona, M.C. y Fort, R. (1994): Estudio de la degradación de los materiales pétreos y tratamientos para su restauración, en dependencias del Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Madrid). *Ingeniería Civil* 96: 99-113.
- [21] Alvarez de Buergo, M., Fort, R. y Gómez Heras, M. (2004): El Monasterio de Uclés (Cuenca, España): caracterización y deterioro de los materiales de construcción. *Materiales de Construcción* 54 (275): 5-22.
- [22] Fort, R. y Rodríguez Blanco, R. (1996): Degradación de las rocas carbonáticas del Claustro de Santa María La Real de Nieva (Segovia). *Geogaceta* 20: 1232-1235.
- [23] Pérez -Montserrat, E. y Fort, R. (2004): Caracterización y procedencia de la piedra de sillería granítica del Convento de la Encarnación (Madrid). *Geo-temas*, 6 (1): 89-92.
- [24] Fort, R. y Alvarez de Buergo, M. (2005): *Estado de Conservación de la Colegiata de Santa Juliana, Santillana del Mar (Cantabria)*. Madrid: CSIC.
- [25] Varas, M.J, Molina, E. y Vicente, M.A. (2003): Características petrofísicas de la arenisca usada en el patrimonio monumental de Ciudad Rodrigo (Salamanca, España). *Materiales de Construcción* 53 (269): 73-88.
- [26] Fort, R. (1996): Effects of consolidates and water repellents on the colour of the granite rock of the Aqueduct of Segovia (Spain). En M.A. Vicente, J. Delgado-Rodrigues y J. Acevedo (eds.) *Degradation and conservation of granitic rocks in monuments*: 435-440. Bruselas: European Commission.
- [27] Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Varas Muriel, M.J. y Gómez-Heras, M. (2004): Panteón de Hombres Ilustres, Madrid, Spain: Building Materials, Degradation and Conservation. En L. Aires-Barros y F. Zezza (eds.) *Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage. 6th International Symposium on Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*: 123-127. Lisboa.
- [28] Louis, M. García del Cura, M.A., Spairani, Y., Prado, R. y Huesca, J.A. (2004): El Palacio de la Diputación Provincial de Alicante. Caracterización y diagnóstico de lesiones de los materiales de las fachadas. En *VII Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio y Edificación*: 269-272. Yaiza (Lanzarote): Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio.
- [29] López de Azcona, M.C., Mingarro, F. y Fort, R. (1999): Restauración del zócalo granítico del Palacio Real de Riofrío (Segovia). *Restauración y Rehabilitación* 29: 34-44.
- [30] Vazquez-Calvo, C., Varas, M.J., Fort, R. y Alvarez de Buergo, M. (2007): Conservation state of the bioclastic limestones of the Don Pedro façade from los Alcázares Reales Palace of Sevilla (Spain). En *Abstracts from SWAPNET 2007 & Workshop on Limestone Decay and Conservation (Malta, 24-26 May)*. *Stone. Newsletter on stone decay* 2: 40. [http://www.qub.ac.uk/geomaterials/weathering/newsletter/issue_2.pdf].
- [31] Mingarro, F., Fort, R., López de Azcona, C. y Alonso, A. (1993): La Puerta de Alcalá: Degradación y conservación de la Piedra. En P. García-Escudero (ed). *La Puerta de Alcalá: Su historia y su restauración*: 62-88. Madrid: Ayuntamiento de Madrid / El Corte Inglés.
- [32] Louis, M., García Del Cura, M^a.A., Bernabéu, A., La Iglesia, A., Spairani, Y., Huesca, J.A. y Prado, R. (2006): The Restoration of a stone bridge in semiarid environment: Puente Viejo of Elche (SE Spain). En R.Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vazquez Calvo (eds.) *Heritage, Weathering & Conservation*. Vol 2: 881-885. Londres: Taylor & Francis.
- [33] Louis M., García del Cura, M.A., Spairani Y. y Bernabéu, A. (2003): Las casas palacio del siglo XVIII, sede del Museo Provincial de Bellas Artes de Alicante (MUBAG). *Roc Maquina* 81: 14-20.
- [34] Palaia, L., Galvaña, V. y García del Cura, M.A. (2000): Air pollution and stone decay in urban environment: the façade of the Main House at Valencia city. In E. Galán (ed.) *Protection and conservation of the cultural heritage of the mediterranean cities*: 37-39. Sevilla: International Group for the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin.

- [35] Mingarro, F (1996): *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- [36] Esbert, R., Ordaz, J., Alonso, F.J., Montoto, M., González Limón, T. y Alvarez de Buergo, M. (1997): *Manual de diagnóstico y tratamiento de materiales pétreos y cerámicos*. Barcelona: Colegio de aparejadores y arquitectos técnicos de Barcelona.
- [37] Fort, R. (1995): *El deterioro del Patrimonio Histórico-Artístico*. Master de Educación Ambiental. Universidad a Distancia. Monografías Fundación Universidad Empresa.
- [38] Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2007): Influence of Past Protective Treatments on Decay of Heritage Stone Structures: A Practical Case Study. *Studies in Conservation* 52 (2) (En prensa).
- [39] Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E. y Fort, R. (2007) : Decay of the restoration render mortar of the church of *San Manuel ad San Benito*, Madrid, Spain: Results from optical and electron microscopy. *Materials Characterization* (En prensa).
- [40] Saiz-Jimenez, C. y Garcia del Cura, M.A. (1991): Sulfated crusts: a microscopic, inorganic and organic analysis. En N.S. Baer, C. Sabbioni, A.I. Sors (eds.) *Science, Technology and European Cultural Heritage*: 527-530. Oxford: Comission of the European Communities / Butterworth Heinemann.
- [41] López de Azcona, M.C., Fort, R. y Mingarro, F. (1998): El Palacio Real de Madrid (España): Alteración del granito debido al microambiente de su entorno. En *IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación*: 77-78. La Habana: Centro Internacional para la conservación del Patrimonio.
- [42] Fort, R., Alvarez de Buergo., M., Mingarro, F. y López De Azcona, M.C. (2003): Procesos químicos en la superficie de piedras de construcción por contaminación antrópica. *Afinidad LX* (507): 450-457.
- [43] Fort, R. (2007): La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: Medidas de prevención. En E. Pérez-Monserat, M. Gómez-Heras, M. Alvarez de Buergo y R. Fort (eds). *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*: 57-70. S.S. de los Reyes: Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro.
- [44] Fort, R., Alvarez de Buergo, M., López de Azcona, M.C. y Mingarro,F. (2004): Efficiency of urbanistic reorganizations on the atmospheric pollution reduction in monumental areas En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air pollution & Cultural Heritage*: 225-232. Lisse: Balkema.
- [45] Gómez Heras, M., Benavente, D., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2004): Soluble salt minerals from pigeon droppings as potential contributors to the decay of stone based cultural heritage. *European Journal of Mineralogy* 16: 505-509.
- [46] García del Cura, M.A., de Los Ríos, A. y Ascaso, C. (2004): Castillo de Biar (Alicante). Un ejemplo de bioalteración del Patrimonio Arquitectónico en clima semiárido. En *Estudio del Patrimonio mediante técnicas de haces de iones, 6ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*: 27-29. Sevilla: CSIC.
- [47] Ascaso, C., García del Cura, M.A. y de Los Ríos, A. (2004): Microbial biofilms on carbonate rocks from a quarry and monuments in Novelda (Alicante-Spain). En L. St Clair y M. Seaward (eds). *Lichen biodeterioration: Progress and Problems*: 70-74. Nueva York: Kluwer Academic-Plenum Publisher.
- [48] Gómez Heras, M., Fort, R. y Smith, B.J. (2004): Problemas de escala en la interpretación del deterioro térmico por insolación de piedra de construcción. *Geo-temas* 6 (1): 263-266.
- [49] Gómez-Heras, M., Smith, B.J. y Fort, R. (2006): Surface temperature differences between minerals in crystalline rocks: implications for granular disaggregation of granites through thermal fatigue. *Geomorphology* 78 (3-4): 236-249.
- [50] Gómez-Heras, M., Fort, R. y Smith, B.J.: Influence of surface heterogeneities of building granite on its thermal microenvironment and its potential for the generation of thermal weathering. *Building and Environment*. (En prensa).

- [51] Benavente, D., Martínez-Martínez, J., Cueto, N. y García del Cura, M.A. (2007): Salt weathering in dual-porosity building dolostones. *Engineering Geology* 94: 215-226.
- [52] Benavente, D., Cueto, N., Martínez-Martínez, J., García del Cura, M.A. y Cañaveras, J.C. (2007): Influence of petrophysical properties on the salt weathering of porous building rocks. *Environmental Geology* 52: 197-206.
- [53] López-Arce, P., García-Guinea, J., Benavente, D., Tormo, L. y Doehne, E.: Deterioration of dolostone by magnesium sulphate salt: an example of incompatible building materials at Bonaval Monastery, Spain. *Construction and Building Materials*. (En prensa)
- [54] López-Arce, P., Doehne, E., Greenshields, J., Benavente, D. y Young, D.: Treatment of rising damp and salt decay: The historic masonry buildings of Adelaide, (SA). *Materials and Structures*. (En prensa).
- [55] Martínez-Martínez, J., Bernabéu, A., Benavente, D. y García del Cura, M.A. (2007): Stone decay in civil heritage constructions due to salt crystallisation: Salinetes bridge (SE Spain). En *7th Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin* : 101-103. Orleans, Francia.
- [56] Benavente, D., García del Cura, M.A., Bernabéu, A. y Ordóñez, S. (2001): Quantification of salt weathering in porous stones using an experimental continuous partial immersion method. *Engineering Geology* 59 (3-4): 313-325.
- [57] Gómez-Heras, M. y Fort, R. (2007): Patterns of halite (NaCl) crystallisation in building stone conditioned by laboratory heating regimes. *Environmental Geology* 52 (2): 239-247.
- [58] Fort, R., Fernández-Revuelta, B., Varas, M.J., Álvarez de Buergo, M. y Taborda, M. (2008): Influencia de la anisotropía en la durabilidad de las dolomías Cretácicas de la Comunidad de Madrid frente a la cristalización de sales. *Materiales de Construcción* 289. (En prensa).
- [59] Sancho, C., Fort, R. y Belmonte, A. (2003): Weathering rates of sandstone historic structures in semiarid environments (Ebro Basin, NE Spain). *Catena* 53: 53-64.
- [60] Fort, R., Varas, M.J., Pérez-Monserrat, E. y Vázquez-Calvo, M.C. (2005): Hexahidrita-epsomita en el deterioro de piedra dolomítica del patrimonio arquitectónico. *Macla* 3: 77-79.
- [61] Gómez-Heras, M., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Rebollar, E., Oujja, M. y Castillejo, M. (2003): Laser removal of water repellent treatments on limestone. *Applied Surface Science* 219 (3-4): 290-299.
- [62] Gómez-Heras, M., Fort, R., Morcillo M., Molpeceres C. y Ocaña J.L. (2008): Calentamiento por láser: una técnica mínimamente invasiva para el estudio del calentamiento producido por el fuego en materiales pétreos de construcción. *Materiales de Construcción* 289. (En prensa).
- [63] Gómez-Heras, M., Varas, M.J., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2004): Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires. En D. Kwiatkowski y R. Löfvendahl (eds.) *10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*: 561-568. Stockholm: ICOMOS.
- [64] Gómez-Heras, M., Figueiredo, C., Varas, M.J., Mauricio, A., Álvarez de Buergo, M., Aires-Barros, L. y Fort, R. (2007): Digital image analysis contribution to the evaluation of the mechanical decay of granitic stones affected by fires. En S.K. Kourkoulis (ed.) *Fracture and failure of natural building stones. Applications in the Restoration of Ancient Monuments*: 427-437. Berlin: Springer.
- [65] Gómez-Heras, M., Alvarez de Buergo, M., Varas, M.J., Fort, R., Morcillo, M. y Molpeceres, C. (2006): Fire damage of building stones: methodological considerations on current research. En: *COST Action C17 Built Heritage: Fire Loss to Historic Buildings*: 132-141. Bulgaria.
- [66] Gómez-Heras, M., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Hajpál, M., Török, A. y Varas, M.J. (2006): Evolution of porosity in Hungarian building stones after simulated burning. En R. Fort, M. Álvarez de Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez-Calvo (eds.) *Heritage Weathering and Conservation*. Vol. 1: 513-520. Londres: Taylor & Francis.
- [67] Ordóñez, S., Fort, R. y García del Cura, M.A. (1997): Pore size distribution and the durability of a

porous limestone. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 30: 221-230.

[68] Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordóñez, S. (1999): Thermodynamic modelling of charges induced by salt pressure crystallisation in porous media of stone. *Journal of Crystal Growth* 204: 168-178.

[69] Benavente D, García del Cura M.A. y Ordóñez S. (2003): Salt influence on evaporation from porous building rocks. *Construction and Building Materials* 17 (2): 113-122.

[70] Benavente, D., García del Cura, M.A., Fort, R. y Ordóñez, S. (2004): Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength. *Engineering Geology* 74: 113-127.

[71] Gómez Heras, M. y Fort, R. (2002): *Cámara Automática para envejecimiento de materiales de construcción por insolación*. Patente nº: 200201376. España. CSIC.

[72] Fort, R. (2006): Utilización de la Piedra Natural en Restauración. En M.A. García del Cura y J.C. Cañaveras (eds.) *Utilización de rocas y minerales industriales*. Vol. 2: 155-182. Seminario de la Sociedad Española de Mineralogía. Alicante: Universidad de Alicante.

[73] Ordóñez, S., García del Cura, M.A., Fort, R. y Pina, J.A. (1996): El "Crema Marfil" (Pinoso, Alicante) I. Características petrofísicas y parámetros de durabilidad. *Geogaceta* 20: 727-730.

[74] García del Cura, M.A., Ordóñez, S., Fort, R. y Pina, J.A. (1996): El "Crema Marfil" (Pinoso, Alicante) II- Criterios petrográficos de calidad. *Geogaceta* 20: 731-734.

[75] García del Cura, M.A., Rodríguez, M.A., Pina, J.A., Cañaveras, J.C., Baltuille, J.M. y Ordóñez, S. (1999): Los mármoles comerciales "Marrón Imperial" y "Marrón Emperador" (SE de España). Caracterización petrológica y criterios de exploración. *Boletín Geológico y Minero* 110: 67-76.

[76] Benavente, D., Bernabéu, A., Fort, R., García del Cura, M.A., La Iglesia, A. y Ordóñez, S. (2000): Caracterización mineralógica, petrológica y petrofísica del mármol comercial Rojo Alicante (Cavarrasa, Alicante). *Geotemas* 1 (1): 255-260.

[77] García del Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A., Fort, R., La Iglesia, A. y Ordóñez, S. (2005): Las calizas microcristalinas como material de construcción: el caso del Gris Pulpis. *Materiales de Construcción* 55 (277): 5-23.

[78] Dapena, J.A., Ordóñez, S. y García del Cura, M.A. (1989): Estudio de las rocas calizas utilizadas durante los siglos XVIII y XIX en la construcción de los Palacios de Madrid. *Ingeniería Civil* 71: 67-77.

[79] Fort, R., Bernabéu, A., García del Cura, M.A., Ordóñez, S., López de Azcona, M.C. y Mingarro, F. (2004): La piedra de Novelda: una roca muy utilizada en el patrimonio arquitectónico. *Materiales de Construcción* 52 (266): 19-32.

[80] Mendiña, J., Fort, R., García del Cura, M.A., Galán, L., Pérez-Soba, C., Perez-Monserrat, E.M., Fernández-Revuelta, B., Bernabéu, A. y Varas, M.J. (2005): *Las piedras utilizadas en la construcción de los bienes de interés cultural de la Comunidad de Madrid hasta el siglo XIX*. Madrid: IGME.

[81] Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Perez-Monserrat, E. y Varas, M.J.: Monzogranitic batholiths as a supplying source for the heritage construction in the northwest of Madrid. *Engineering Geology* (En prensa)

[82] Varas, M. J., Gómez-Heras, M. y Fort R. (2003): Abastecimiento de piedra en monumentos de Madrid del siglo XIX: La Cripta de la Catedral de Santa María de la Almudena y el Panteón de Hombres Ilustres. *Restauración y Rehabilitación* 79: 46-51.

[83] Fort, R. y Mendiña, J. (2005): *Canteras Históricas de la Comunidad de Madrid*. [<http://www.madrima.sd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geomonumentales/rutas/canteras/default.asp>].

[84] Fort, R. (1996): Localización de antiguas canteras utilizadas en el patrimonio monumental. En F. Mingarro (ed.) *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*: 311-316. Madrid: Editorial

Complutense.

[85] García Del Cura, M.A., Fort, R., Bernabéu, A., Benavente, D. y Ordóñez, S. (2003): Rocas carbonáticas como pavimentos exteriores en cascos históricos: calizas microcristalinas. En *Air pollution & Cultural Heritage*, 4ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC :101-102. Sevilla: CSIC.

[86] Bernabéu, A., Benavente, D., Fort, R., García del Cura, M. A., Martínez-Martínez, J. y Mendiña, J. (2004): Valoración petrofísica del granito de Zarzalejo (Sistema Central) para su utilización como piedra de pavimento en cascos históricos. En *Estudio del Patrimonio mediante técnicas de haces de iones*, 6ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC: 17-19. Sevilla: CSIC.

[87] García Del Cura, M.A., Bernabéu, A., Benavente, D., Rodríguez, M.A. y Cañaveras, J.C. (2005): Estudio comparado de ofitas y granitos para su adecuación a su uso como adoquines. En *La Doble Cultura*, 7ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC: 20. Madrid: CSIC.

[88] García del Cura, M.A., Bernabéu, A., Pérez Soba, C., Benavente, D., Martínez-Martínez, J. y Fort, R. (2008): Granitos y otras rocas plutónicas del Sistema Central usados en el adoquinado histórico de Madrid. *Geotemas*. (En prensa).

[89] García Del Cura, M.A., Benavente, D., Bernabéu, A. y Martínez-Martínez, J. (2008): Study of the effect of surface finishes on granites and limestone to be used as external paving stone slabs. *Materiales de Construcción* 289. (En prensa).

[90] Louis, M., Spairani, Y., Bernabéu, A. y García del Cura, M.A. (2004): Utilización de hidrofugantes en calcarenitas: Restauración de la portada de San Agatángelo de la Basílica de Santa María de Elche. En *Técnicas para la caracterización del patrimonio*, 5ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC: 22. Madrid: CSIC.

[91] Alvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2001): A basic methodology for evaluating and selecting water-proofing treatments applied to carbonatic materials. *Progress in Organic Coatings* 43: 258-266.

[92] Alvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2003): Characterizing the construction materials of historic building and evaluating possible preservation treatments for restoration purposes architectural heritage. *Journal of the Geological Society of London* sp 205: 241-254.

[93] Fort, R., Alvarez de Buergo, M., Varas, M.J. y Vázquez, M.C. (2005): Valoración de tratamientos con polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos del patrimonio. *Revista de Plásticos Modernos* 89 (583): 83-89.

[94] Fort, R. (1996): La conservación de la piedra monumental. En F. Mingarro (ed.) *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*: 481-492. Madrid: Editorial Complutense.

[95] Fort, R. (1996): Modificación de propiedades petrofísicas de las rocas con la utilización de consolidantes e hidrofugantes. En F. Mingarro (ed.) *Degradación y conservación del Patrimonio Arquitectónico*: 492-505. Madrid: Editorial Complutense.

[96] Fort, R. (2007): Polímeros sintéticos para la conservación de materiales pétreos. En E. Perez-Monserrat, M. Gómez-Heras, M. Alvarez de Buergo y R. Fort (eds.) *Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo. Cuaderno técnico*: 71-82. S.S. de los Reyes: Dpto. Publicaciones Universidad Popular José Hierro.

[97] Alvarez de Buergo, M., Fort, R. y Gómez-Heras, M. (2004): Contributions of SEM to the assessment of the effectiveness of stone conservation treatments. *Scannig* 26 (1): 41-47.

[98] Vázquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M., Fort, R. y Varas, M.J. (2007): Characterization of patinas by means of microscopic techniques. *Materials Characterization* (En prensa).

[99] Fort, R., Varas, M.J., Pérez-Monserrat, E., Luque, J. Álvarez de Buergo, M. y Vázquez-Calvo, C. (2007): Los ladrillos de la Muralla de Talamanca de Jarama (Madrid): Criterios de diferenciación. *Boletín*

[100] Martínez-Martínez, J., Benavente, D., y García del Cura, M.A. (2006): La propagación de ultrasonidos en el estudio de materiales pétreos: aplicación al estudio de las propiedades textoestructurales de las rocas y de su grado de alteración. En C. López Jimeno (ed.) *Ingeniería del Terreno. Ingeoter 8*: 171-194. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.

[101] Fort, R. y Rodríguez, J. (2001): Prospección ultrasónica para determinar la deterioro de la Estela de Barros (Cantabria). En B. Gómez Tubío, M.A. Respaldiza y M.L. Pardo (eds.) *III Congreso Nacional de Arqueometría*: 49-58. Sevilla: Universidad de Sevilla / Fundación El Monte.

[102] Martínez-Martínez, J., Benavente, D. y García del Cura, M.A. (2004): El tratamiento de señales ultrasónicas como método de auscultación de rocas porosas: aplicación al estudio de la alteración de la piedra en monumentos históricos. En *Jornadas sobre Geología y Geotecnia del Patrimonio Histórico*. Madrid: A.E.G.A.I.N. (Asociación Española de Geología Aplicada a la Ingeniería).

[103] Martínez-Martínez, J., Benavente, D. y García del Cura, M.A. (2004): Tratamiento de señales ultrasónicas para el estudio de la alteración de rocas porosas: Iglesia de San Bartolomé, Jávea (Alicante). En *Técnicas para la caracterización del patrimonio, 5ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*: 9. Madrid: CSIC.

[104] Fort, R., Varas, M.J., Vázquez Calvo, M.C. y Ruiz Montero, I. (2006): *Estudios Previos a la Obra de Restauración y Conservación de la Fachada del Palacio del Rey. D. Pedro I, en el Alcázar de Sevilla. (Estudios en la Piedra)*. Convenio de Investigación: Patronato de los Reales Alcázares y el CSIC (Antonio Almagro). Inédito.

[105] Fort, R y Alvarez de Buergo, M.: Decay evolution of granites used in the architectural heritage by means of Schmidt hardness and ultrasound velocity measurements. *Quarterly Journal for Engineering Geology and Hydrogeology*. (En prensa)

[106] Galán, E., Vázquez, M.A., Guerrero, M.A., Ortiz, P. y Zezza, F. (2003): Non-destructive techniques: their application to the study of stone decay in monumnets. Two cases studied. En J.L. Pérez-Rodríguez (ed.) *Applied study of cultural heritage and clays*: 91-112. Madrid: CSIC.

[107] Gosálbez, J., Salazar, A., Bosch, I., Miralles, R. y Vergara, L. (2006): Application of ultrasonic nondestructive testing to the diagnosis of consolidation of a restored dome. *Materials Evaluation* 64 (5): 492-497.

[108] Martínez-Martínez, J.: *Influencia de la alteración sobre las propiedades mecánicas de rocas carbonáticas anisótropas*. Tesis Doctoral. Universidad Alicante. (En preparación).

[109] Anglos, D. (2001): Laser-induced breakdown spectroscopy in art and archaeology. *Applied Spectroscopy A* 55 (6): 186-205.

[110] Maravelaki, P.V., Zafiropulos, V., Kilikoglou, V., Kalaitzaki, M. y Fotakis, C. (1997): Laser-induced breakdown spectroscopy as a diagnostic technique for the laser cleaning of marble. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 52 (1): 41-53.

[111] Asmus, J.F. (2003): Non-divestment laser applications in art conservation. *Journal of Cultural Heritage* 4: 289-293.

[112] Oujja, M., Rebollar, E. y Castillejo, M. (2003): Spectroscopic studies of laser ablation plumes of artwork materials. *Applied Surface Science* 211 (1): 128-135.

[113] Vazquez-Calvo, C., Giakoumaki, A., Anglos, D., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2007): Classification of patinas found on surfaces of historical buildings by means of Laser Induced Breakdown Spectroscopy. En J. Nimmrichter, J., Kautek, W. y Schreiner, M. (ed.) *Lasers in the conservation of artworks. LACONA VI*: 415-420. Berlin: Springer-Verlag.

[114] Ferrero, J.L., Roldán, C., Juanes, D. y Rovira, S. (2001): Análisis EDXRF de pigmentos de la Dama de Baza (s. IV a.C.). En B. Gómez Tubío, M.A. Respaldiza y M.L. Pardo (eds.) *III Congreso*

[115] Thornbush, M.J. y Viles, H.A. (2006): Use of portable X-ray fluorescence for monitoring elemental concentrations in surface units on roadside stone at Worcester College, Oxford. En R. Fort, M. Álvarez de Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 613-619. Londres: Taylor & Francis.

[116] Vázquez-Calvo, C., Álvarez de Buergo, M., Fort, R., Gómez-Tubío, B., Ortega Feliu, I. y Respaldiza, M. (2004): Análisis de Pátinas históricas del Patrimonio Arquitectónico mediante Fluorescencia de Rayos X Portátil. En *Estudio del Patrimonio mediante técnicas de haces de iones, 6ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*: 35-36. Sevilla: CSIC.

[117] Bernabéu, A., García Del Cura, M.A., y Ordóñez, S. (2003): Tratamientos de tipo inorgánico de rocas ornamentales porosas para su mejora de calidad. Aplicación a la Piedra Bateig. En *Técnicas de Conservación del Patrimonio, 3ª Reunión Monográfica de la Red Temática de Patrimonio Histórico del CSIC*: 23. Madrid: CSIC.

[118] Bernabéu, A., García del Cura, M.A., Hills, C. y Carey, P. (2006): Cementation of porous building stone by an accelerated carbonation process. En R. Fort, M. Álvarez de Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez-Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 719-725. Londres: Taylor & Francis.

[119] Bernabéu, A., Exposito, E., Montiel, V., Ordóñez, S. y Aldaz, A. (2001): A new electrochemical method for consolidation of porous rocks. *Electrochemistry communications* 3: 122-127.

[120] Bernabéu, A., Exposito, E., Montiel, V., Ordóñez, S. y Aldaz, A. (2003): *Procedimiento para sellar un material pétreo*. Patente: nº: ES2183696.

[121] Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2003): Protective Patinas applied on stony façades of Historical Building in the past. *Construction & Building Materials* 17 (2): 83-89.

[122] Vázquez-Calvo, C., Álvarez de Buergo, M., y Fort, R. (2006): Patinas in the Architectural Heritage of Lerma, Burgos (Spain). En: R. Fort, M. Álvarez de Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez-Calvo (eds) *Heritage, Weathering and Conservation* Vol. 2: 969-974. Londres: Taylor and Francis.

[123] Vázquez-Calvo, C., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2007): Overview of recent knowledge of patinas on stone monuments: the Spanish experience. En R. Prikryl y B. Smith (eds.) *Building Stone Decay: from Diagnosis to Conservation*: 295-307. Londres: The Geological Society of London. Special Publication 271.

[124] Camaiti, M., Fommei, C., Giamello, M., Sabatini, G. y Scala, A. (1996): Trattamenti di superfici lapidee secondo antiche ricette: primi risultati sulla formazione di ossalati di calcio. En: M. Realini y L. Toniolo (eds.) *II International Symposium: The oxalate films in the conservation of works of art*: 287-298. Milan: EDITEAM.

[125] Lanterna, G., Mairani, A., Matteini, M., Rizzi, M., Scuto, S., Vincenzi, F. y Zannini, P. (2000): Mineral inorganic treatments for the conservation of calcareous artefacts. En V. Fassina (ed.) *Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone* Vol. 2: 387-394. Amsterdam: Elsevier.

[126] Fort, R. (2005): Rutas geomonumentales de la Comunidad de Madrid. [<http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/patrimonio/rutas/geomonumentales/default.asp>].

[127] Pérez-Monserrat, E., Varas, M.J., Gómez-Heras, M., Álvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2006): Rutas Geomonumentales: una herramienta para la difusión del patrimonio arquitectónico. En *VIII Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación: "La Dimensión Social del Patrimonio"*: Vol. 1: 215-226. Buenos Aires-Salta (Argentina): Centro Internacional para la Conservación del Patrimonio.

[128] Álvarez de Buergo, M., Pérez-Monserrat, E.M. y Fort, R. (2006): Geomonumental Routes: a useful tool for popularizing the built heritage. En J. Radic, V. Rajcic y R. Zarnic (eds.) *Heritage Protection. Construction Aspects*: 623-630. European Construction Technology Platform.

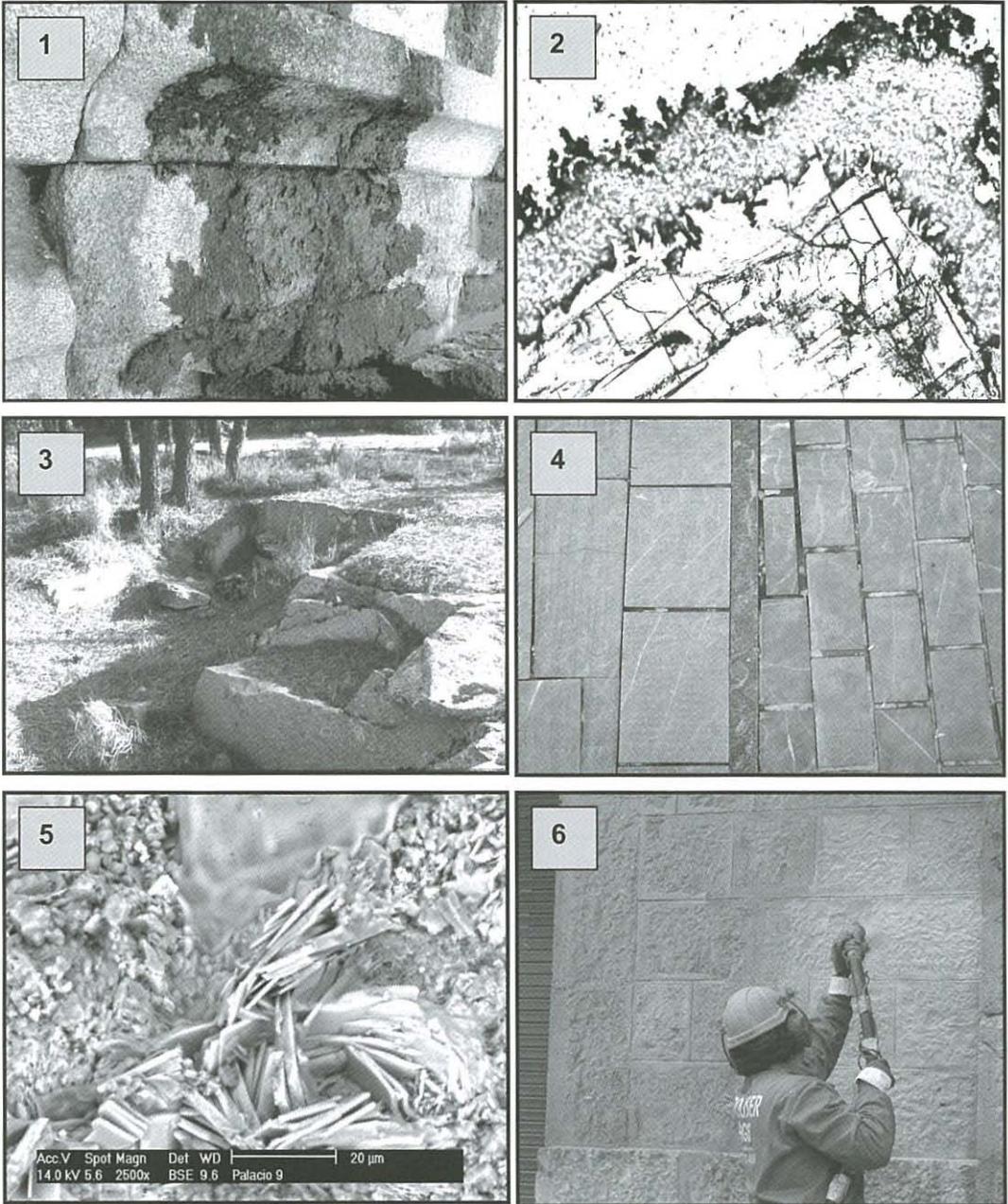


Figura 1. 1. Costra negra sobre granito. 2. Costra negra de yeso con procesos de disolución y figuración de faldespato. Microscopio de polarización. 3. Cantera antigua de granito utilizada párale abastecimiento de piedra en el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Madrid). 4. Piedra de pavimentación en Peñíscola (Castellón). 5. Antiguo tratamiento de ceras con procesos de yesificación sobre piedra granítica. 6. Prueba de limpieza en fachada de caliza.

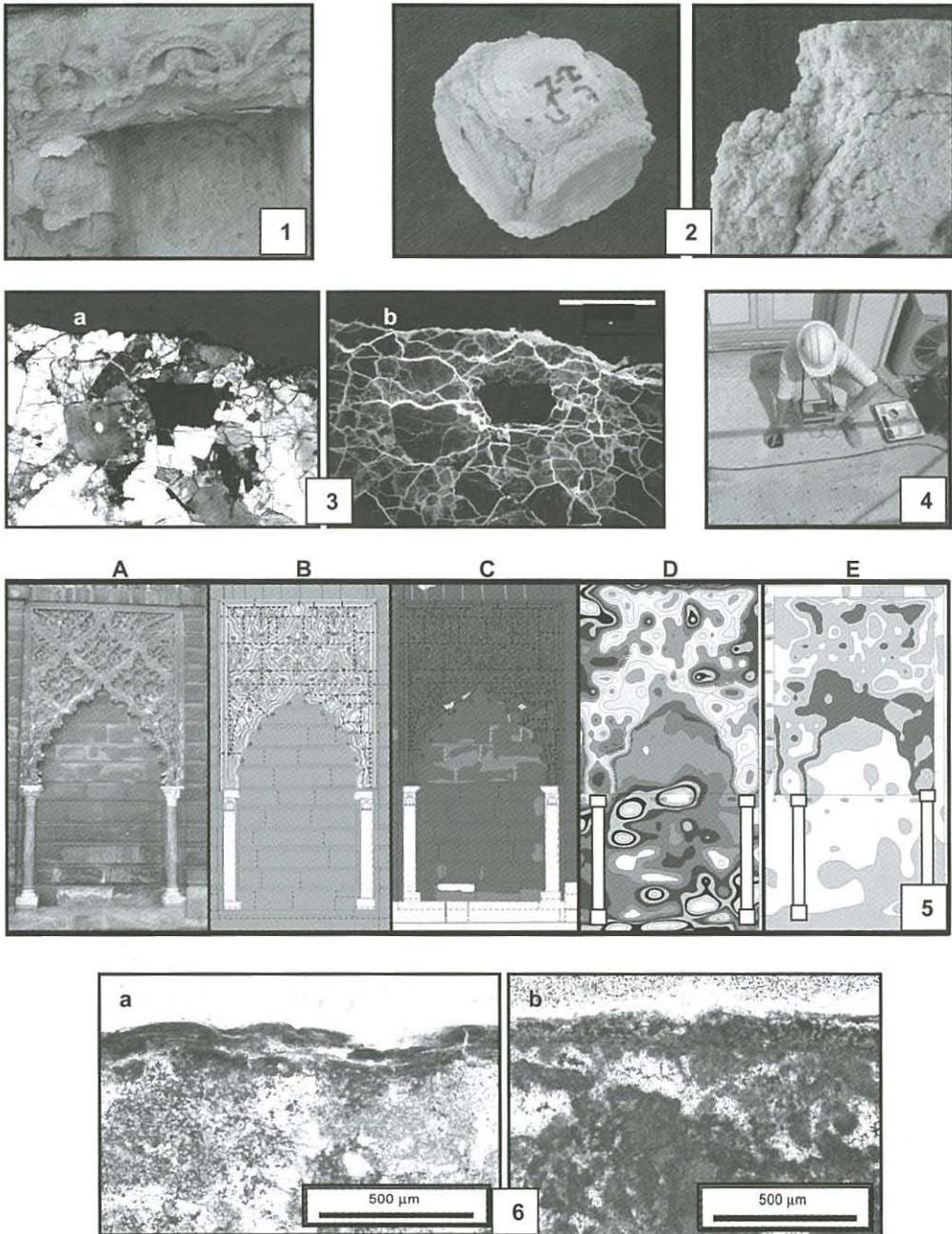


Figura 2. 1. Deterioro por tratamiento de consolidación e hidrofugación. 2. Envejecimiento acelerado por cristalización de sales de la Piedra de Redueña. 3. Aspecto de granito al microscopio de polarización (a) y microscopio de fluorescencia (b). Se aprecia la figuración sufrida por acción del fuego. 4. Prospección magnetométrica. 5. Arcada inferior de la Fachada de D. Pedro I, en el Alcázar de Sevilla. A- Fotografía de la arcada. B- Disposición de materiales C- Daños observados. D- Distribución de la velocidad de propagación de ultrasonidos. E- Establecimiento del grado de intervención. 6. a) Aspecto de pátina histórica sobre caliza visto a través de microscopio de polarización. b) Aspecto de pátina diseñada.

GEOLOGÍA - GEOQUÍMICA - MICROCLIMA APLICADOS A LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO

Sergio Sánchez-Moral, Soledad Cuezva, Angel Fernández-Cortés¹ y Juan C. Cañaveras¹

Museo Nacional de Ciencias Naturales (Dpto. Geología), CSIC, José Gutiérrez Abascal, 2. 28006-Madrid.

(1) Unidad Asociada-Laboratorio Petrología Aplicada UA-CSIC Dpto. CC. de la Tierra y Medioambiente, Univ. Alicante.

Resumen. El equipo de investigación de Geología - Geoquímica - Microclima aplicados a la Conservación del Patrimonio se formó bajo la dirección de Manuel Hoyos Gómez a principios de la década de los 90 y actualmente está coordinado desde el Departamento de Geología del MNCN e integrado por miembros de ese centro de investigación y de la Unidad Asociada -Laboratorio Petrología Aplicada Universidad de Alicante-CSIC. En el campo de la Conservación del Patrimonio, nuestras investigaciones se han centrado especialmente en la protección del arte rupestre y actualmente se enfocan al estudio integrado de ambientes subterráneos (cuevas, catacumbas, etc.) y al estudio de los procesos de deterioro de representaciones artísticas prehistóricas con especial atención a los parámetros microclimáticos, geoquímicos y geomicrobiológicos.

1. LOS COMIENZOS DEL GRUPO

El equipo de investigación de Geología - Geoquímica - Microclima aplicados a la Conservación del Patrimonio se formó bajo la dirección de Manuel Hoyos Gómez a mediados de la década de los 90. Bajo su dirección, el grupo continuó una línea que él ya había desarrollado en la década anterior con los primeros estudios geológicos del entorno de la Cueva de Altamira y posteriormente, estudios diagnóstico sobre la conservación de otras cavidades con arte rupestre (Nerja, Arenaza, Santimamiñe, etc...). En nuestros primeros trabajos llevados a cabo en abrigo con arte rupestre de Andalucía [1], Manuel Hoyos Gómez, maestro nuestro y de tantos en estos temas, al observar un abrigo con pinturas rupestres decía que lo increíble es que después de miles de años expuestos a la intemperie fuera posible todavía contemplar algunas de las pinturas y grabados en relativo buen estado de conservación. Según él, lo más importante era llegar a deducir y a comprender cuáles habían sido las condiciones ambientales que habían permitido la subsistencia de una fina lámina de óxido de hierro sobre un soporte rocoso después de pasar tanto tiempo expuesto a las inclemencias meteorológicas (lluvia, viento, insolación, etc.). En su opinión, el objetivo de nuestros estudios debía centrarse en la búsqueda de esas condiciones porque serían las óptimas para la conservación de la representaciones artísticas; al menos, y dados los numerosos cambios ambientales de carácter natural que podrían haber sufrido desde su elaboración, definir las condiciones "menos malas" para su preservación. Para ello el estudio debía implicar aspectos geológicos de escala local y regional, petrológico, geoquímicos (roca-agua), climáticos y geomicrobiológicos. Tras su fallecimiento en 1999, la línea por él abierta y desarrollada se continuó sin ningún tipo de apoyo institucional y continúa en la actualidad, abarcando nuevos ámbitos pero especialmente centrada en los medios hipogeos que albergan algún tipo de bien patrimonial.

2. HISTORIAL RESUMIDO DEL GRUPO

La experiencia del equipo incluye el estudio de algunas de las más relevantes cuevas y abrigos rupestres con arte prehistórico de la Península Ibérica y de las Islas Canarias. De entre los estudios de larga duración llevados a cabo destacan los trabajos realizados en los principales abrigos con arte rupestre de Andalucía (Tajo de las Figuras, Atlanterra, Letreros, Graja, Encajero, Peñas Cabreras) y Castilla la Mancha (Villar del Humo) y en diferentes cuevas españolas como la Cueva de Tito Bustillo, Candamo, Ardales, Zuheros, Santimamiñe, El Reguerillo, Gáldar y especialmente en la Cueva de Altamira, donde se trabaja en esta línea desde 1996. En esta misma línea se han llevado a cabo estudios específicos de diagnóstico y prevención de daños por actividades antrópicas en varias cuevas con arte rupestre del Principado de Asturias (La Loja, El Buxu, El Pindal), de Cantabria (Santián, Cobrante, Urdiales) y del País Vasco (Arenaza, Altxerri, Ekain, Ventalaperra). Asimismo, se han realizado trabajos similares en la Grotta dei Cervi (Italia) que constituye uno de los principales ejemplos de ese país dentro de las cuevas kársticas con arte rupestre neolítico. Recientemente participamos en un proyecto europeo para el estudio de las condiciones de conservación de las Catacumbas Romanas de Domitilla y San Calixto. En la actualidad, además de los estudios en Altamira, coordinamos los trabajos geoarqueológicos en la Cueva de El Sidrón (Asturias), dirigimos diversos estudios para la conservación de la Necrópolis de Carmona (Sevilla), Cueva de Doña Trinidad (Ardales, Málaga), Cueva de Castañar de Íbor (Cáceres) y Cueva del Canelobre (Alicante). Por último, participamos en el Proyecto Djehuty, cuyos objetivos son la excavación, restauración y estudio de las tumbas de Djehuty y de Hery situadas en Dra Abu el-Naga, una de las necrópolis de la orilla oeste de la antigua Tebas, en la región de Luxor (Egipto).

El principal beneficio de esta dilatada experiencia multidisciplinar radica en un conocimiento exhaustivo de la problemática de los sistemas kársticos en especial y de los ambientes hipógeos en general, así como de la metodología más apropiada para su estudio y de la puesta en práctica de dicha metodología en las especiales condiciones de humedad a saturación que se dan en la mayoría de las cavidades. La precisión de los sistemas de medidas diseñados específicamente para cada cueva o ambiente estudiado, junto con la metodología de estudio multidisciplinar ha dado lugar a la obtención de resultados novedosos y de gran aplicabilidad para la conservación de los ambientes estudiados.

3. CONSERVACIÓN DE ARTE RUPESTRE

Desde un punto de vista ambiental, existen dos tipos de sitios o emplazamientos principales con arte rupestre [1]:

- Sitios expuestos directa (aire libre) o casi directamente (abrigos) a las condiciones atmosféricas externas.

Las representaciones artísticas situadas sobre afloramientos rocosos totalmente al aire libre no son muy numerosas pero en la Península Ibérica se encuentran ejemplos destacados como la estación rupestre de Siega Verde (Castillejo de Martín Viejo - Salamanca) y el cercano yacimiento de Foz Côa (valle del río Côa Portugal), destacando ambos conjuntos de arte paleolítico entre los más importantes de este tipo en toda Europa. En cuanto a los enclaves situados en abrigos rocosos, destacan todos aquellos (727) incluidos en 1998 en la lista del Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO dentro del Conjunto de Arte Rupestre del Arco Mediterráneo de la Península Ibérica distribuidos por Cataluña, Aragón, Castilla-la Mancha, Valencia, Murcia y Andalucía [Comarca de los Vélez (Almería y

Granada) Sierra Morena, Quesada y Sierra de Segura (Jaén)]. En esta comunidad, donde hemos desarrollado un mayor número de trabajos de investigación, existen además otros enclaves relevantes en la provincia de Cádiz (Cueva del Moro, El Tajo de las Figuras, Atlanterra) y en la provincia de Málaga (Conjunto Pictórico de Peñas Cabreras).

- Sitios situados en cavidades naturales bajo la superficie terrestre (cuevas) y por tanto protegidos parcialmente de las condiciones externas.

El mayor número de cavidades con arte rupestre paleolítico se da en el sudoeste de Europa, con distinguidos ejemplos como las cuevas pintadas del Valle del Vézère (Francia) y la Cueva de Altamira (Cantabria) incluidas en la lista del Patrimonio de la Humanidad de la UNESCO. En la Región Cantábrica (Cantabria, Asturias, País Vasco) existen más de 100 cuevas con arte rupestre, siendo menos numerosas en Andalucía, donde no obstante existen ejemplos muy relevantes como la Cueva de la Pileta y de Doña Trinidad de Ardales en Málaga y la Cueva de los Murciélagos en Zuheros (Córdoba).

Las características geológicas y ambientales y en definitiva las físico-químicas y energéticas de cada uno de estos enclaves son muy diferentes, de forma que las aproximaciones metodológicas para el estudio deben adaptarse específicamente al ambiente estudiado. Los escenarios sometidos a la intemperie bajo condiciones naturales son medios de alta oscilación energética con una alta disponibilidad de luz y nutrientes para macro y microorganismos, por oposición a los situados en cavidades naturales. Esa alta energía de los medios al aire libre conlleva que, una vez han resistido el paso de miles de años, muestren una menor fragilidad para su conservación respecto a las cuevas, mucho más susceptibles al deterioro inducido por perturbaciones energéticas de carácter antrópico. La mera presencia de un grupo de visitantes durante unos minutos frente a un panel de pinturas rupestres situado en una cueva, puede provocar variaciones de temperatura y humedad superiores a las que soporta la cueva bajo condiciones naturales durante todo un ciclo anual [2, 3]. Esas modificaciones unidas a los aportes de materia orgánica que se transportan desde el exterior pueden generar una alteración progresiva del microambiente que resulte en un deterioro irreversible a medio-largo plazo.

Los principales logros de nuestro grupo en este campo han sido:

Abrigos: En la década de los 90 se realizaron una serie de estudios en los principales abrigos con arte rupestre de Andalucía: Peñas Cabreras y Tajo de las Figuras [4], Atlanterra, Alemanes y Letreros [5] y Graja y Encajero [6]. Estos estudios se desarrollaron dentro de un Convenio de Colaboración entre la Junta de Andalucía y tres centros del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (MNCN-IRNASE-IETCC). Por parte del Museo Nacional de Ciencias Naturales (MNCN) se estableció un protocolo de estudio de los procesos de alteración de los abrigos y los trabajos tuvieron carácter de diagnóstico y trataron fundamentalmente de llevar a cabo la definición del entorno geológico, geomorfológico y geográfico, el análisis de la red de diaclasado/fracturación (Figura 1) y de la hidrología de las cavidades y abrigos y el estudio de las características mineralógicas, petrográficas y geoquímica de la roca soporte de las pinturas rupestres.

Los resultados detallados de gran parte de estos estudios han quedado recientemente reflejados en [7] y [1]. Además de los daños sufridos por la actividad antrópica, incluido el vandalismo), gran parte de las alteraciones encontradas en los abrigos correspondían a fenómenos físico-químicos naturales, cuyas medidas correctoras son difíciles de aplicar sin producir otros cambios de consecuencias imprevistas, siendo no obstante posible en algunos casos atenuar la acción de agentes naturales como el viento, el agua y la insolación. En el caso

de conjuntos situados al aire libre y en abrigos rocosos, el empleo de los sistemas de información geográfica (SIG) sobre modelos digitales del terreno, se muestra como una herramienta de enorme utilidad para el estudio y la conservación de representaciones artísticas. Asimismo, la adquisición de medidas morfométricas de detalle sobre los afloramientos rocosos, permite igualmente obtener parámetros cuantitativos muy útiles en la priorización de las medidas de conservación de estos importantes elementos del patrimonio artístico [8]. Además la gran cantidad de datos obtenidos y obtenibles en trabajos de investigación de esta índole, procedentes de metodologías analíticas diversas, hace recomendable el uso de estos métodos informáticos de tratamiento de datos espaciales. Su aplicación en cuevas y abrigos, permitiría al gestor disponer de una base de datos como punto de partida para cualquier futuro estudio o intervención que se vaya a llevar a cabo en el sitio arqueológico. Esta herramienta permite su continua actualización y en ella pueden y deben integrarse todos aquellos resultados surgidos de cualquier aproximación metodológica.

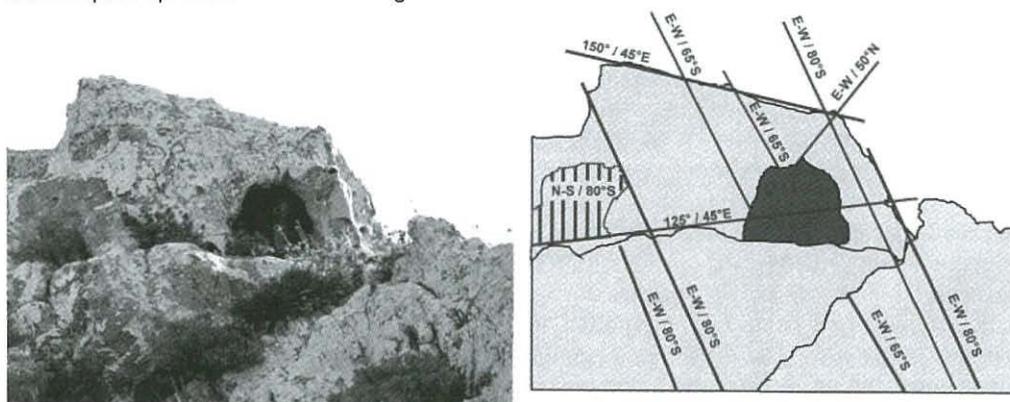


Figura 1. Fotesquemata del estudio de la red de diaclasado del abrigo de Atlanterra (Cádiz).

Cuevas: Los kársts son sistemas naturales complejos y frágiles que se han visto deteriorados por diferentes actividades humanas, como deforestación, minería, construcción, agricultura, etc., a las que hay que añadir su uso como zonas de recreo y turismo [9]. Muchas cavidades kársticas albergan elementos geológicos, biológicos y culturales que deben ser preservados, por lo que la gestión de estos sistemas debe ir encaminada a compatibilizar el disfrute y la conservación de estos bienes patrimoniales. Esto es especialmente importante en cuevas con arte rupestre y yacimientos arqueológicos que aportan datos de incalculable valor acerca de los orígenes de la humanidad. Científicos y autoridades han reconocido la importancia social y económica del turismo en cuevas, así como los problemas relacionados con su gestión y protección. En cuevas con arte rupestre, está tristemente demostrado que un régimen de visitas masivo o incontrolado es uno de los factores más dañinos en lo que a conservación se refiere. En 1991, en la Mesa Redonda Hispano-francesa para la Protección y Conservación del Arte Rupestre Paleolítico celebrada en Colombres (Asturias) se concluyó que un amplio conocimiento científico de los parámetros kársticos y ambientales y la definición de unos umbrales de equilibrio para cada cueva son factores clave en la conservación del patrimonio rupestre, así como para el establecimiento de un sistema de visitas adecuado [10]. Debido a su propio metabolismo, cada visitante produce una serie de modificaciones en el microclima interior de la cueva. Estos cambios están inducidos por la radiación de calor a través de la piel, la producción de CO₂ y vapor de agua, así como el consumo de oxígeno mediante la respiración. La cuantificación de estos aportes depende de las características físicas de cada visitante

(peso, altura, edad,...), del tiempo de permanencia en el interior de la cueva y de las características morfométricas de la misma, especialmente el volumen de la cavidad considerada.

El establecimiento de áreas de protección en el sistema kárstico y de un régimen de visitas controlado puede ayudar a la conservación del arte rupestre al mismo tiempo que se hace compatible con el disfrute de estos valores patrimoniales. Dada la gran cantidad de variables que componen y afectan al microclima kárstico y su interacción con el soporte físico (roca encajante, espeleotemas, pinturas,...etc), cuantificar la capacidad de visitas de una cavidad kárstica es una tarea compleja. Por esta razón debe basarse en un conocimiento extensivo y multidisciplinar del sistema kárstico, enfocado en un primer término a discriminar los cambios ambientales naturales de los inducidos por las actividades antrópicas.

A finales de la década de los 90, desde el MNCN-CSIC, M. Hoyos coordinó científicamente un estudio integrado de carácter multidisciplinar de la cueva, en el marco de un proyecto financiado por la Comunidad Europea (*Deterioration of prehistoric rock art in karstic caves by mass tourism. Integrated study (environment, geology, geochemistry and microbiology) for their conservation*, PL950679, 1996-99). En este proyecto se completó el seguimiento de los parámetros microambientales de la cueva de Altamira, entre otras (Tito Bustillo, Candamo, Grotta dei Cervi), con especial detalle en la Sala de Polícromos, durante un ciclo anual completo (febrero 1997- febrero 1998). Los trabajos realizados se centraron en el estudio del soporte de la cavidad (geología), el estudio de las aguas que afectaban a la cavidad (hidrogeología), los microorganismos presentes en la cueva (microbiología) y, principalmente, el diseño, instalación y puesta en marcha de un sistema operativo de medidas y registro automático de parámetros microambientales en la cavidad con objeto de conocer en cada momento la situación de los diferentes parámetros y su evolución durante las visitas, enfocado a minimizar el impacto que puedan provocar en la cavidad y, por tanto, en las pinturas [3, 9, 11, 12]. Los resultados obtenidos en ese proyecto y en los que anterior y posteriormente se han llevado a cabo en otras cavidades han permitido un gran avance en el conocimiento de la problemática de conservación del patrimonio en medios subterráneos naturales entre los que destacan:

- Definición del Área de Protección Total de la Cueva de Altamira [13], Tito Bustillo [14], Venta Laperra [15], Arenaza [16], Altxerri y Santimamiñe [17] y Cueva del Tesoro [18]. Los criterios seguidos para la delimitación se han basado fundamentalmente en las recomendaciones recogidas en [10] sobre las diferentes medidas a tomar para la protección de las cuevas con arte rupestre y su entorno, actualizadas con los resultados obtenidos en estudios posteriores. Según esas recomendaciones y su revisión posterior se pueden distinguir varios niveles de protección:

Área de Protección Total (APT). Definida inicialmente como el área que ocupa la cueva en sí y toda la zona del karst, externa e interna a diferentes niveles, en la que las aguas de infiltración y circulación hipogea pueden afectarla. En la revisión actualizada se la denomina también como Área de Captación y Drenaje Kárstico e incluye no sólo la formación rocosa en la que se desarrolla la cueva a proteger sino todas aquellas formaciones que forman la cuenca de captación hídrica debido a las características de la red de drenaje en su zona de ubicación. En ella no debería permitirse sin previa evaluación de su impacto, ningún tipo de actividad que pueda alterar las condiciones naturales de la cueva, ni de las aguas de infiltración que a ella llegan.

Área Inmediata de protección (AIP): Comprende el conjunto de cavidades, galerías y simas del sistema kárstico así como la zona directa de recarga hídrica (impluvium) situadas sobre el nivel de la cueva a proteger. Es un área más restrictiva que el APT y requiere el máximo

grado de conservación con absoluto control del sistema de drenaje y de las características y propiedades de la roca en la que se desarrolla la cavidad y de la cobertera edáfica suprayacente. En ella debe evitarse estrictamente cualquier modificación derivada de actividades antrópicas que puedan afectar o contaminar las propiedades naturales del sistema suelo/roca/cavidad.

Área de Protección Específica (APE). Corresponde a una zona de protección subaérea en función de la actividad antrópica que se va a desarrollar (ej: vibraciones, contaminación aérea), determinándose sus límites para cada situación en particular.

- Evaluación del efecto de vibraciones en diferentes cavidades con arte rupestre (Arenaza, Santimamiñe, Santián, Cueva Urdiales, Cobrante; ver ejemplos en [19-21]). En el caso de la Cueva de Arenaza, los estudios permitieron concluir que las vibraciones producidas por las explosiones de los barrenos en una cantera muy próxima, eran capaces de ampliar las fisuras de la roca favoreciendo la circulación de agua (Figura 2A) y la precipitación de yeso que provoca una fuerte presión de cristalización en el sistema fisural de la roca, así como favorecer los desprendimientos de plaquetas de roca sobre la que se sitúan los pigmentos (Figura 2B).

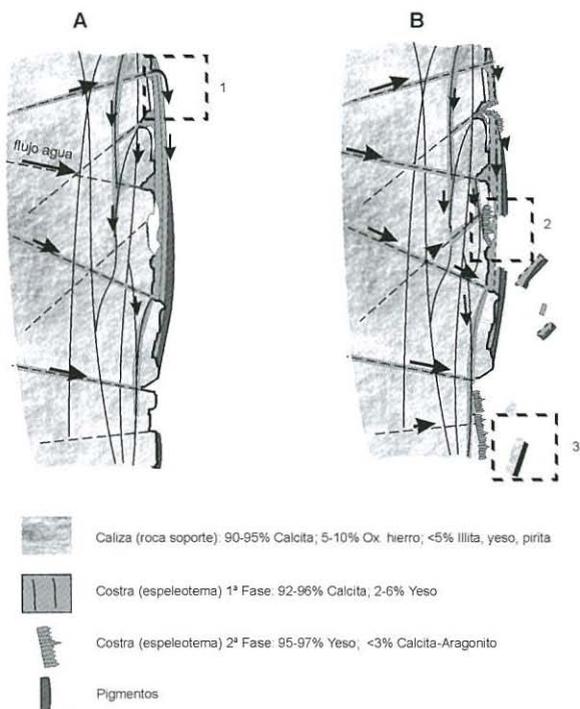


Figura 2. Modelo de desplaquetado de la roca soporte de las pinturas en la Cueva de Arenaza.

- Definición de las características microclimáticas, hidrogeoquímicas y cálculo de la capacidad de visita de la Cueva de Candamo [22] y de la Cueva de Tito Bustillo [23, 24].
- Elaboración de primer modelo cuantitativo de los procesos inorgánicos de corrosión de la roca soporte de las pinturas inducido por la entrada y permanencia diaria de los visitantes en la Cueva de Altamira [2]. Altamira es un sistema de equilibrio dinámico y frágil con

microambiente estable debido a su baja tasa de intercambio energético con el exterior y a su baja tasa de infiltración, siendo precisamente esas las causas del buen estado de conservación de las pinturas rupestres en el momento de su descubrimiento. Una muestra de esa fragilidad son los procesos de alteración sufridos por las pinturas tras su apertura al público (actualmente cerrada). Los visitantes producen un incremento del CO₂, vapor de agua y Temperatura del aire (Figura 3).

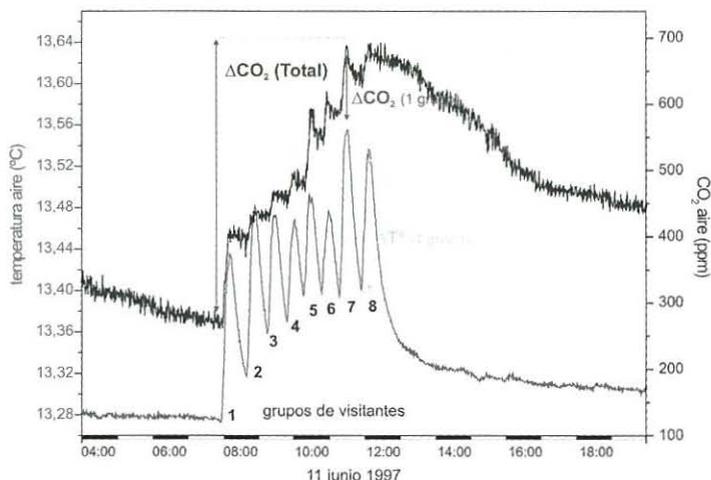


Figura 3. Ejemplo del registro de temperatura y CO₂ en el aire de la Sala de los Polícromos de la Cueva de Altamira durante un día de visita con entrada de 8 grupos.

En un ambiente con humedad próxima a la saturación a lo largo de todo el ciclo anual, estas variaciones favorecen el desarrollo de procesos de microcorrosión de la roca soporte de las pinturas, además de activar los procesos metabólicos de los microorganismos que colonizan la roca. A partir de los datos microclimáticos obtenidos se estimaron tasas de microcorrosión de la roca encajante debido a la entrada de visitantes, 70 veces superiores a las que se producen como consecuencia de una dinámica natural de la cavidad.

- Caracterización del papel del suelo externo en la conservación del microambiente kárstico [25]. El suelo actúa como primera membrana o filtro de las oscilaciones externas. Su espesor, composición y textura (porosidad-permeabilidad) son fundamentales en las características del medio subterráneo ya que actúa como zona de captación y transmisión del agua meteórica y en él tienen lugar numerosos procesos micro y macrobiológicos con generación y consumo de CO₂. Condiciona por tanto la calidad y cantidad de agua que llega al sistema interno.
- Constatación de la existencia de poblaciones microbiológicas que se desarrollan sobre los muros y techos de las cavidades. En el interior de las cavidades hay variaciones ambientales de unas zonas a otras en función principalmente de la distancia a la entrada y del espesor de roca suprayacente en cada punto. Las entradas de las cuevas son regiones en las que las variables ambientales están bajo influencia del ambiente externo. Desde un punto de vista ecológico esta zona de transición entre sistemas epigeos e hipogeos constituye una zona de transición entre sistemas ecológicos adyacentes (Figura 4).

Proporciona un incremento en la disponibilidad de recursos, al tiempo que resulta una zona en la que pueden coexistir especies de ambos ambientes vecinos (epigeo e hipogeo) con aquellas específicas del ecotono mismo, lo que puede llegar a favorecer una mayor

diversidad en el área de transición que en los ambientes contiguos. En los diversos estudios realizados se han obtenido datos relevantes sobre la actividad microbiana en los procesos de precipitación mineral y su efecto en la roca soporte y pinturas y relación con la hidroquímica de las aguas de infiltración [27-34]. Una de las principales conclusiones obtenidas es que para la correcta interpretación de los requisitos ambientales de cada comunidad microbiana es de especial utilidad la realización de mapeos detallados de la distribución de los diferentes tipos de colonias de microorganismos existentes en el medio [35]. Resulta una herramienta de gran utilidad a la hora de realizar un seguimiento de la proliferación y evolución de la distribución espacial de las diferentes comunidades existentes. Además, de identificar el nivel de dispersión respecto a la superficie de la cavidad, permite determinar la distribución de los ecosistemas y las relaciones o condicionantes respecto a estructuras geológicas (fracturas, diaclasas, etc.) y otros factores que determinan la distribución del crecimiento microbiano.

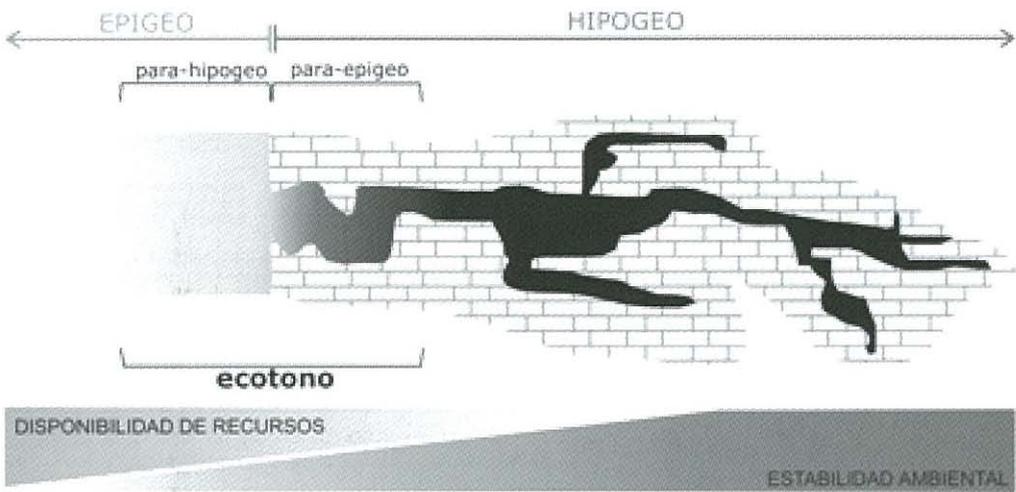


Figura 4. Modelo gráfico de representación de las diferentes regiones del sistema epigeo-hipogeo. Localización de diferentes tipos de comunidades de macro y microorganismos en relación a los niveles de estabilidad y abundancia de recursos en una cueva hipotética (modificado de [26]).

En conclusión, la aplicación de diversas metodologías de estudio y su integración en modelos de funcionamiento de las numerosas cavidades kársticas estudiadas, nos permite en cada caso distinguir los principales mecanismos de deterioro y de manera precisa, diferenciar los debidos a causas naturales y los derivados de la acción antrópica, incluyendo las modificaciones provocadas tanto en el interior del ambiente subterráneo como en su zona externa (Figura 5).

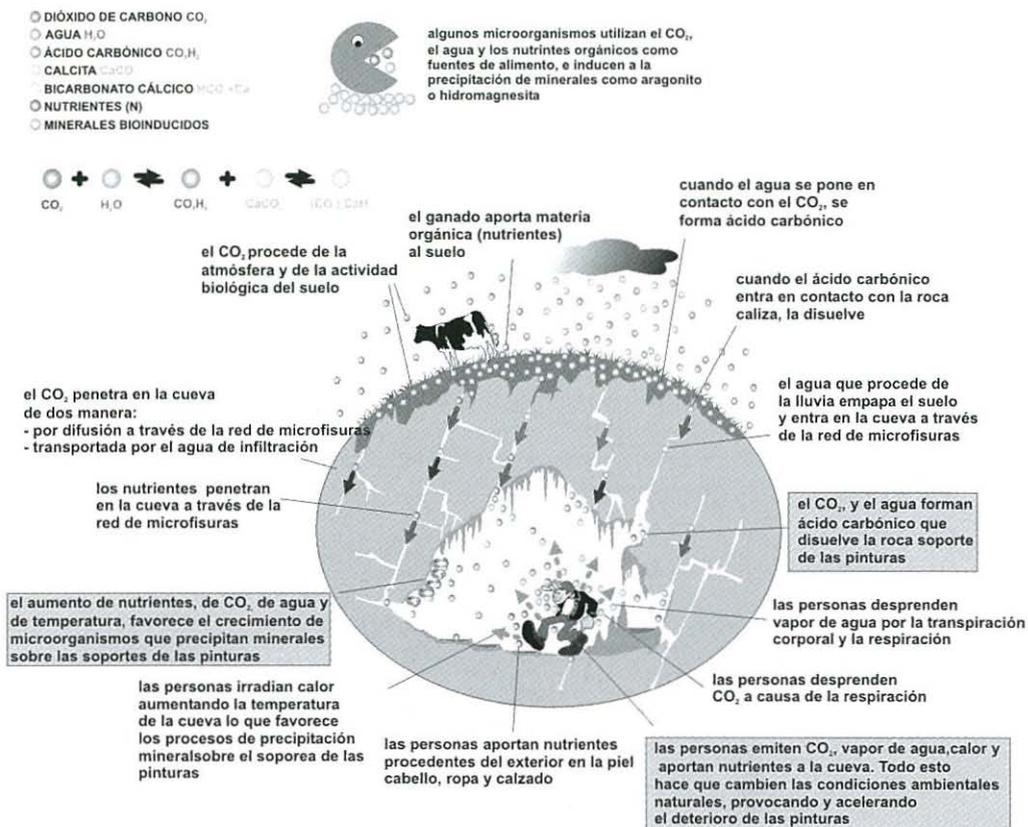


Figura 5. Diagrama esquemático del funcionamiento físico-biogeológico de una cavidad kárstica.

4. CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO EN OTROS AMBIENTES HIPOGEOS

Además de los trabajos realizados en medios kársticos naturales, en los últimos años hemos llevado a cabo diversos trabajos de características metodológicas similares, enfocados a la conservación del patrimonio ubicado en otros ambientes subterráneos, especialmente en monumentos funerarios hipogeos. A continuación y a modo de ejemplo, se expone un resumen de los resultados y conclusiones obtenidas en los estudios de la Cueva Pintada de Gáldar (Gran Canaria) y en las catacumbas de Domitilla y San Calixto (Roma).

4.1. Cueva Pintada de Gáldar

Descubierta en 1873, y declarada Monumento Histórico Artístico y abierta al público en 1972 la Cueva Pintada constituye el ejemplo más genuino de las representaciones artísticas de la cultura aborigen de Gran Canaria (www.cuevapintada.com). Se trata de una cueva artificial excavada en la toba volcánica y cuyas paredes aparecen decoradas con frisos de motivos geométricos. Se sitúa en un poblado troglodita en el que se pueden contemplar restos de viviendas en cuyo interior se conservan materiales testimonio de las actividades de los pobladores pre-hispánicos (www.cuevapintada.com). Los primeros indicios del deterioro de las pinturas se observaron apenas ocho años después de la apertura al público en 1972, siendo cerrada nuevamente en 1982. Por ello y en el marco de tres convenio específicos de

colaboración entre el Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria y el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, a lo largo del período 1997-2005, nuestro equipo procedió a un amplio estudio del entorno y de la propia Cueva Pintada, que abarca el estudio de los tres elementos que la definen y condicionan: la roca soporte [36], los pigmentos, enlucidos y morteros [37], así como las variables climático-ambientales que les afectan [38].

Respecto a la roca soporte, se efectuó una completa caracterización geológica, petrológica y geoquímica que indicó que la toba del Complejo Troglodita formada por piroclastos más o menos cementados y de composición fundamentalmente vítrea muestra una alta sensibilidad a los procesos de alteración, naturales (lluvia, viento) o inducidos por la actividad humana. Además las características de su sistema poroso desaconsejaba el tratamiento con consolidantes.

En una siguiente fase se estudiaron muestras de pigmentos y morteros para identificar los componentes empleados, obtenidos a partir de materias minerales como arcillas y caliches, todas ellas accesibles en las inmediaciones del poblado. Se concluyó que la elaboración de los morteros implicó el calentamiento de pasta carbonatada por encima de los 120°C, para su posterior mezcla con áridos. Así mismo pudo caracterizarse de forma precisa cada tipo de pigmento, pudiendo comprobarse que, como en el caso de los pigmentos blancos de composición halloysítica, se llevaba a cabo una selección y búsqueda rigurosa en zonas próximas al Parque Arqueológico.

Finalmente y tras el conjunto de los estudios de conservación realizados desde 1997, especialmente encaminados a la caracterización de los materiales que componen el Parque Arqueológico, el Estudio se completó tras un nuevo período de investigación en el que se llevó a cabo el análisis de las condiciones microambientales de la Cueva Pintada, desde el momento previo al inicio de las obras de acondicionamiento en julio de 2003, hasta su práctica finalización en abril de 2005. En cavidades con representaciones artísticas, como la Cueva Pintada de Gáldar, la experiencia acumulada ha demostrado que los procesos naturales de deterioro de las representaciones artísticas y su soporte, se ven incrementados considerablemente debido a un régimen de visitas masivo o incontrolado. En el caso de la Cueva Pintada, además del efecto de las futuras visitas, debían tenerse en cuenta las modificaciones de las condiciones microambientales que serían provocadas por las obras de acondicionamiento del nuevo Museo.



Figura 6. Equipos de monitorización microclimática instalados en la Cueva Pintada de Gáldar.

Por ello era necesario evaluar dichos cambios mediante la comparación de los datos registrados antes del comienzo de las obras, con los que se fueran obteniendo a medida que avanzaran los trabajos, hasta la instalación final de la cubierta. El objetivo final era determinar los rangos microclimáticos adecuados para el mantenimiento de unas condiciones internas estables, que favorecieran tasas de intercambio moderadas con el exterior. Con ello se pretendía evitar la acción perjudicial de modificaciones microambientales intensas que pudieran provocar la inestabilidad de los materiales que componen los paneles decorados [39]. De esa forma podrían fijarse las condiciones ambientales óptimas que evitaran, en la medida de lo posible, que los flujos de energía creados por las visitas y los cambios provocados por las obras de acondicionamiento generaran modificaciones perjudiciales para el mantenimiento de su estado de conservación.

Tras un período de 21 meses (15/07/2003 a 25/04/2005), se constató que la colocación de la cubierta de 5.500m² sobre todo el yacimiento y especialmente la eliminación del cierre antiguo de ladrillos pueden considerarse beneficiosas para la conservación de la cueva pero las modificaciones ambientales se encuentran aún en estado de transición y adaptación a las nuevas condiciones originadas por las obras. Los datos indican que fuertes variaciones de humedad pueden cambiar las condiciones de intercambio de aire entre el exterior y el interior, reflejadas en modificaciones significativas de la concentración de gas Radón (Figura 7). En los períodos en los que la humedad relativa interior alcanza y mantiene valores por encima del 70% la tasa de renovación del aire disminuye. Por el contrario, en períodos secos con valores inferiores al 45%, esa tasa de renovación aumenta respecto a los valores medios anuales. De esta forma pudieron marcarse unos umbrales de humedad que no debían sobrepasarse: valores por encima del 70%, ni por debajo del 45%.

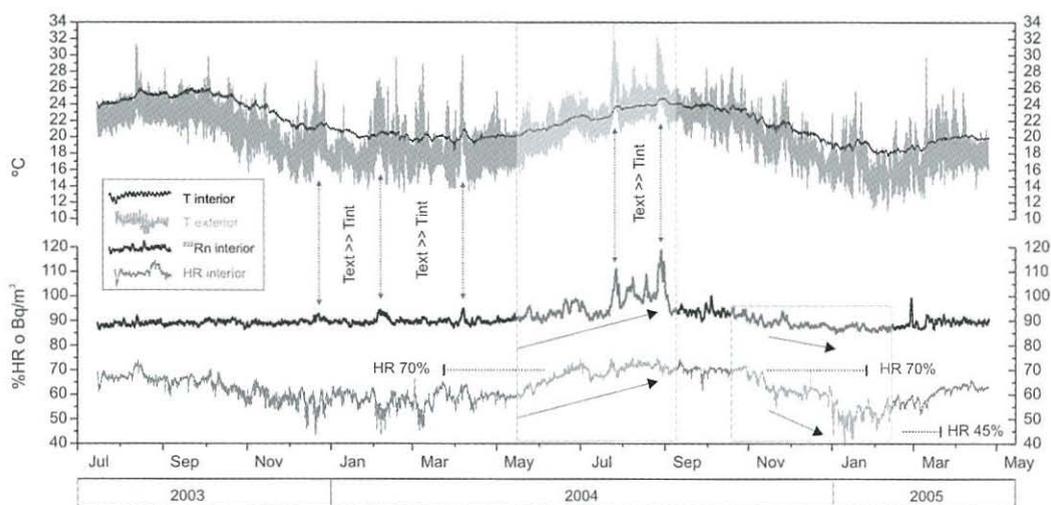


Figura 7. Relación entre la Temperatura exterior e interior, Humedad Relativa del aire interior y Radón interior a lo largo de todo el período de monitorización. Desde junio a agosto de 2004 la humedad relativa del aire interior experimenta un incremento considerable y alcanza y mantiene sus máximos valores por encima del 72%. Tras ese período de menor ventilación y máxima humedad, durante el mes de enero de 2005, la situación se invierte y la humedad interior alcanza sus valores mínimos (<45%) en paralelo al descenso del Radón.

4.2. Catacumbas de Roma

Como miembros participantes en el proyecto europeo ENK4-CT2000-00028: *Cyanobacteria attack rocks (CATS): control and preventive strategies to avoid damage caused by cyanobacteria and associated microorganisms in Roman hypogean monuments*, durante el período 2000-2003 desarrollamos un nuevo estudio geológico, geomicrobiológico y microambiental para el estudio de las condiciones de conservación de las Catacumbas Romanas de Domitilla y San Calixto [40]. En colaboración con el IRNASE (CSIC), los estudios llevados a cabo pueden resumirse así:

1. Caracterización de la roca volcánica y de los materiales de construcción de las catacumbas [41, 42].
2. Caracterización microambiental de una zona interna de la catacumba afectada por la entrada de visitantes [43].
3. Estudio de los procesos de biomineralización asociados a los microorganismos presentes en las catacumbas [44, 45].
4. Estudio y evaluación de los mecanismos y de los procesos de deterioro y Elaboración de un modelo explicativo del patrón de colonización microbiana en función de las condiciones microambientales y las propiedades geoquímicas y petrofísicas de los materiales [46].

Los resultados obtenidos a lo largo del proyecto nos permitieron concluir que los procesos de deterioro de la roca y de los materiales de construcción y decoración presentes en las catacumbas, estaban directamente relacionados con las obras de acondicionamiento para su uso turístico y con las variaciones microambientales inducidas por la masiva entrada de visitantes. El deterioro de roca, morteros y estucos son favorecidos y/o específicamente provocados por la iluminación eléctrica instalada y por las modificaciones de temperatura, humedad y concentración de CO_2 causadas por las visitas.

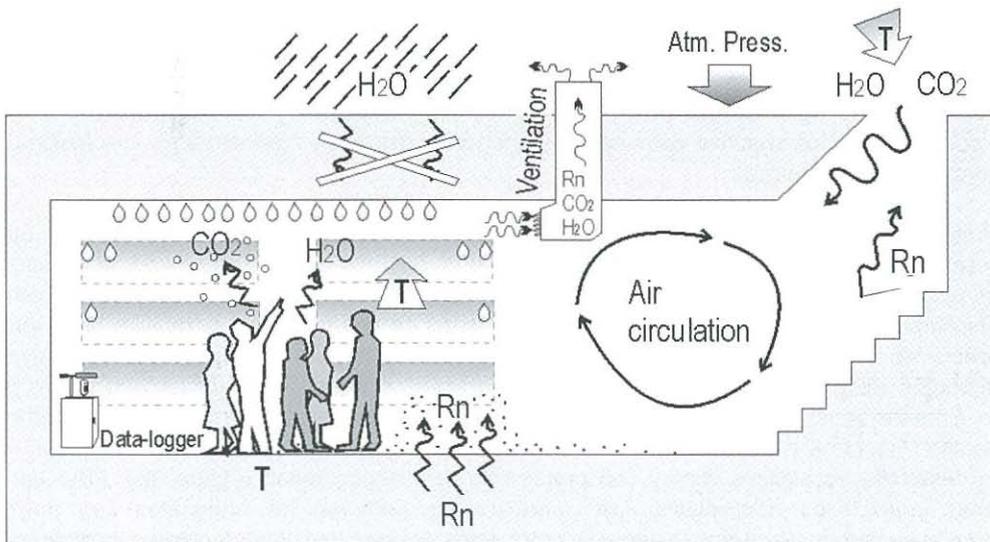


Figura 8. Diagrama esquemático de los efectos inducidos por la entrada de visitantes entre los que destacan los intensos fenómenos de condensación generados en paramentos elevados y la renovación de aire forzada para evitar la acumulación de gas radón en el ambiente. Esa ventilación artificial trae consigo la removilización de partículas entre las que se encuentran abundantes esporas microbianas.

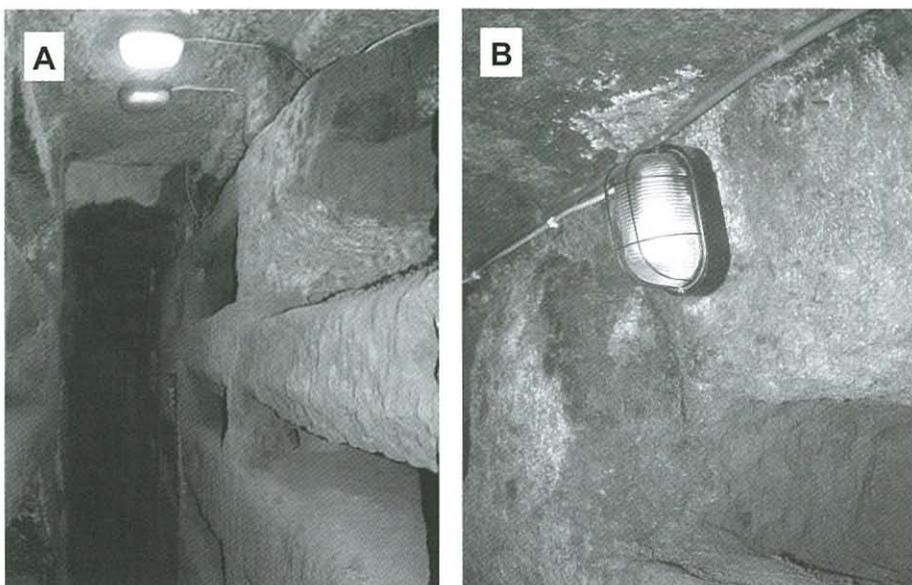


Figura 9. A) Biofilm blanco compuesto por actinobacterias cubriendo los paramentos horizontales elevados en uno de los corredores de la catacumba de San Calixto. B) Biofilm verde asociado a una de las lámparas que iluminan un cubículo de la catacumba de Domitilla.

Las áreas visitadas sufren fuertes cambios ambientales: (a) Fuertes incrementos de la temperatura del aire y de la roca debido a que las lámparas alcanzaban hasta 60°C en su superficie; (b) evaporación del agua disponible y descenso de la humedad relativa del aire; (c) incremento de la humedad total del aire y de la concentración de CO₂ emitidos por los visitantes; (d) bruscos descensos de la temperatura al ser apagadas las luces con la consiguiente condensación de agua enriquecida en CO₂ sobre los soportes y los propios biofilms; (e) microcorrosión de los soportes carbonatados (morteros, estucos y mármoles) por disolución de minerales solubles (calcita).

La intensa colonización microbiológica observada en los soportes se caracterizaba por una sucesión biológica definida por el material que sirve de sustrato en cada caso y por la distancia a los puntos de iluminación. Los microorganismos con menor tolerancia a la desecación como los biofilms blancos con predominio de actinobacterias se desarrollaban siempre a una cierta distancia de las lámparas y preferentemente sobre los niveles de roca que constituyen paramentos elevados y con un sistema poroso caracterizado por un menor tamaño medio de poro. En esas zonas se observa una intensa condensación provocada por la respiración de los visitantes (Figuras 8 y 9A). En las zonas iluminadas próximas a las lámparas se observaba un gran desarrollo de biofilms verdes con predominio de cianobacterias (Figura 9B). Para unas mismas condiciones ambientales, las cianobacterias prefieren los sustratos con mayor contenido en carbonato cálcico (estucos) y entre estos, los que mayor contenido en molibdeno y fósforo presentan, elementos que juegan un importante papel en la fijación del nitrógeno y en la estructura final del biofilm. En conjunto, la acción de las comunidades microbianas sobre los soportes son de dos tipos: procesos destructivos y procesos constructivos. Los procesos destructivos consisten en la disolución-corrosión de los soportes y causan la desintegración parcial o total de la superficie del sustrato (roca encajante, morteros, estucos y pigmentos)

generando diversas fábricas destructivas (fábricas de microdisolución: "etching", "pits", etc...) en ocasiones directamente sobre las pinturas. Los procesos constructivos: formación de biofilms y/o tipos específicos de depósitos minerales que cubren o deterioran el sustrato, siendo por tanto capaces de producir una amplia variedad de fábricas minerales (precipitación mineral, calcificación microbiana). En las catacumbas estudiadas y en los trabajos de laboratorio derivados de dichos estudios, se identificaron diversas fases minerales bioinducidas por diferentes especies de bacterias presentes en dichos ambientes: estruvita ($MgNH_4PO_4 \cdot 6H_2O$), brusita ($CaHPO_4 \cdot 2H_2O$), witherita ($BaCO_3$), barita ($BaSO_4$) y vaterita ($CaCO_3$).

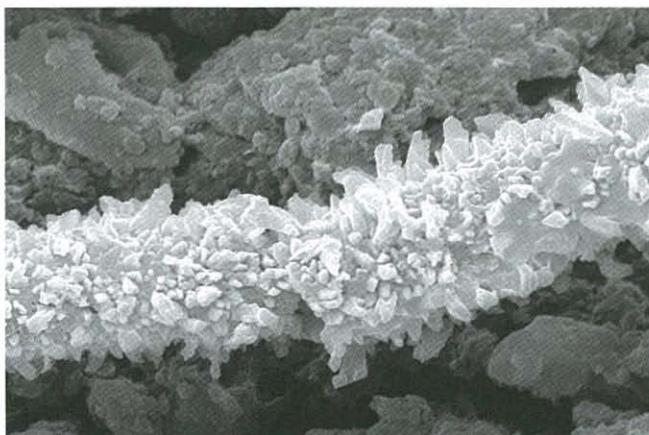


Figura 10. Microfotografía de scanning ambiental en falso color, mostrando la calcificación de una vaina de cianobacteria muestrada junto a un punto de luz en la catacumba de Domitilla.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Sanchez-Moral S. y Cañaveras J. C. (2008): Aspectos geológicos y microambientales en la Conservación del Arte Rupestre: Estudios en Andalucía. Servicio de Publicaciones de la Junta de Andalucía: (en prensa).
- [2] Sánchez-Moral, S., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sanz-Rubio, E., Van Grieken, R. y Gysells, K. (1999): Inorganic deterioration affecting Altamira Cave. Quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors. *Science of the Total Environment* 243: 67-84.
- [3] Sánchez-Moral, S., Soler, V. y Cañaveras, J.C. (2000): Caracterización microambiental en sistemas kársticos someros (Cueva de Altamira, Cantabria). *Geotemas* 1(3): 345-350.
- [4] Hoyos M., Cañaveras, J.C., Sánchez Moral, S., Sanz Rubio, E., Blanco, M.T., Puertas, F., Palomo, A., Sáiz C. y Ariño, X. (1995): *Estudio de los procesos de alteración de las rocas y pinturas de los abrigos de Peñas Cabreras y Tajo de las Figuras*. Informe inédito. Junta de Andalucía.
- [5] Hoyos M., Cañaveras, J.C., Sánchez Moral, S., Sanz Rubio, E., Blanco, M.T., Puertas, F., Palomo, A., Sáiz C. y Ariño, X. (1996): *Estudio de los procesos de alteración de las rocas y pinturas de los abrigos de Atlanterra y Alemanes (Cádiz) y de los Letreros (Almería)*. Informe inédito. Junta de Andalucía.
- [6] Hoyos M., Cañaveras, J.C., Sánchez Moral, S., Sanz Rubio, E., Blanco, M.T., Puertas, F., Palomo, A., Sáiz C., Láiz L. y Hermosín B. (1998). *Estudio de los procesos de alteración de las rocas y pinturas de los abrigos de Cueva de la Graja y Cueva del Encajero*. Informe inédito. Junta de Andalucía.

- [7] Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Hoyos, M. y Sanz-Rubio, E. (1996): Los procesos de alteración en las rocas soporte de las pinturas de los conjuntos rupestres del Tajo de las Figuras (Cádiz) y Peñas Cabreras (Málaga). *Geogaceta* 20 (5): 1222-1225.
- [8] Díez-Herrero A., Lario J., Gutiérrez-Pérez I., Alonso-Azcárate J., Sánchez-Moral S. y Cañaveras J.C. (2006): Análisis de la insolación directa potencial como factor de degradación de los conjuntos pictóricos rupestres de Villar del Humo (Cuenca). En A. Pérez Alberti y J. López Bedoya (eds) *Geomorfología y territorio: actas de la IX Reunión Nacional de Geomorfología*: 993-1008. Santiago de Compostela: Universidad de Santiago de Compostela.
- [9] Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Soler, V. y Lasheras, J.A. (2000): Procesos kársticos y el ciclo del Carbono (PICG 379). Aplicación de los estudios microclimáticos a la Conservación del Patrimonio en cavidades kársticas. En M.A. Lamolda (ed.) *Programa Internacional de Correlación Geológica. Desarrollo y perspectivas en España. 25º Aniversario del Comité Español. Temas Geológico-Mineros* 30: 45-50.
- [10] Fortea-Pérez, J. (ed.) (1993): *La protección y conservación del arte rupestre paleolítico*. Colombres (Asturias): Servicio de Publicaciones del Principado de Asturias.
- [11] Cañaveras, J.C. y Sánchez-Moral, S. (2002): Impacto ambiental del hombre en las cuevas. En F. Carrasco, J.J., Durán y B. Andreo (eds.) *Karst and Environment*: 499-504. Málaga: Patronato de la Cueva de Nerja.
- [12] Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Soler, V., Saiz, C. Bedoya, J., y Lario, J. (2002). La Conservación del Monumento: En J.A. Lasheras (ed.) *Redescubrir Altamira*: 245-257. Madrid: Turner.
- [13] Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C. y Sanz Rubio, E. (1997): *Definición del Área de Protección Total de la Cueva de Altamira*. Informe inédito para Ministerio de Cultura.
- [14] Cañaveras, J.C., Cuezva, S., Sanz-Rubio, E. y Sánchez-Moral, S. (2006): Definition of protection areas in a prehistoric art cave (Tito Bustillo cave, N Spain). En R. Fort, M. Álvarez Buergo, M. Gómez-Heras y C. Vázquez Calvo (eds.) *Heritage, Weathering and Conservation*: 813-817. Londres: Taylor & Francis.
- [15] Hoyos, M., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Lario, J. y Sanz-Rubio, E. (1994): *Área de protección total de la Cueva de Venta Laperra (Valle de Carranza, Vizcaya)*. Informe inédito para Departamento de Cultura del Gobierno Vasco.
- [16] Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C. y Sanz Rubio, E. (1994): *Área de protección total de la Cueva de Arenaza (Galdamez, Vizcaya)*. Informe inédito para Departamento de Cultura del Gobierno Vasco.
- [17] Sánchez-Moral, S. y Lario, J. (2006): *Delimitación de las Áreas de Protección de las Cuevas de Santimamiñe (Bizkaia) y Altzerri (Gipuzkoa)*. Informe inédito para el Departamento de Cultura del Gobierno Vasco.
- [18] Hoyos M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez Moral, S. y Sanz Rubio, E. (1996): *Estudio de la delimitación de las áreas de Protección de las cuevas del Tesoro - Higerón - Rincón de la Victoria (Rincón de la Victoria, Málaga)*. Informe inédito para Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía /EDIPSA.
- [19] Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Lario, J. y Sanz-Rubio, E. (1996). Deterioration processes on prehistoric rock-art Arenaza cave (northern Spain). En *Land, Sea and Human Efforts. 28th International Geographical Congress*: 249-250. Utrecht.
- [20] Sánchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E. y Soler, V. (2005): Análisis del estado de conservación de la roca soporte de las pinturas y registro y análisis de vibraciones de fondo en la Cueva de Urdiales. En R. Montes, E. Muñoz y J.M. Morlote (eds.) *Cueva Urdiales (Castro Urdiales, Cantabria)*: 133-138. Ayuntamiento de Castro Urdiales.
- [21] Abella, R. y Sánchez-Moral, S. (2007): *Registro de vibraciones en la Cueva de Cobrante (Voto, Cantabria): Análisis de la influencia de obras específicas de perforación dentro de su Área de Protección Total*. Informe inédito para la empresa REE y la Consejería de Cultura, Turismo y Deporte de Cantabria.

- [22] Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. y Sanz-Rubio, E. (1998): Microclimatic characterization of a karst system. Human impact on microenvironmental parameters of a prehistoric rock art cave (Candamo Cave, northern Spain). *Environmental Geology* 33: 4231-4242.
- [23] Hoyos, M., Soler, V., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. y Sanz Rubio, E. (1996): *Memoria final sobre las características geológico-kársticas y microambientales de la Cueva de Tito Bustillo, Ribadesella*. Informe para la Consejería de Cultura del Principado de Asturias.
- [24] Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Lario, J., Cuezva, S. y Soler, V. (2004): Estudio hidrogeoquímico del sistema kárstico de la Cueva de Tito Bustillo (Ribadesella, Asturias). *Geotemas* 6 (4): 189-191.
- [25] Cuezva, S., Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Lario, J. y Soler, V. (2004): Intercambios de CO₂ suelo/cavidad en un sistema kárstico somero (Cueva de Altamira, Cantabria). *Geotemas* 6: 327-330.
- [26] Prous, X., Lopes Ferreira, R. y Parentoni Martins, R. (1998): Ecotone delimitation : Epigean-hypogean transition in cave ecosystems. *Austral Ecology* 29: 374-382.
- [27] Cañaveras, J.C., Hoyos, M., Sanchez-Moral, S., Sanz-Rubio, E., Bedoya, J., Soler, V., Groth, I. Schumann, P., Laiz, L., Gonzalez, I. y Saiz-Jiménez, C. (1999): Microbial communities associated with hydromagnesite and needle-fiber aragonite deposits in a karstic cave (Altamira, Northern Spain). *Geomicrobiology Journal* 16: 9-25.
- [28] Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Soler, V. y Saiz-Jiménez, C. (2001): Microorganisms and microbially induced fabrics in cave walls. *Geomicrobiology Journal* 18: 223-240.
- [29] Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Bedoya, J., Soler, V. y Lario, J. (2002). Estudios geomicrobiológicos en la Cueva de Altamira (Cantabria, N.España). En F. Carrasco, J.J. Durán y B. Andreo (eds.) *Karst and Environment*: 515-520. Málaga: Patronato de la Cueva de Nerja.
- [30] Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S. y Soler, V. (2004): Protección y conservación de cavidades kársticas con arte rupestre. En P. Alfaro, J.M. Andreu, J.C. Cañaveras y A. Yébenes (eds.) *Documentos del XIII Simposio de la enseñanza de la Geología*: 54-60. Alicante: Universidad de Alicante.
- [31] Cañaveras, J.C., Cuezva, S., Sánchez-Moral, S., Lario, J., Laiz, L., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2006): On the origin of fiber calcite crystals in moonmilk deposits. *Naturwissenschaften* 93: 27-32.
- [32] Cuezva, S., Cañaveras, J.C., González, R., Lario, J., Luque, L., Sáiz-Jiménez, C., Sánchez-Moral, S. y Soler, V. (2003): Origen bacteriano de espelotemas tipo moonmilk en ambiente kárstico (Cueva de Altamira, Cantabria, España). *Estudios Geológicos* 59: 145-157.
- [33] Cuezva, S., Cañaveras, J.C., y Sánchez-Moral, S. (2005): Biomineralizaciones de huntita en espeleotemas de la Cueva de Altamira (Cantabria). *SEM Macla* 3: 65-66.
- [34] Sanchez-Moral S., Cañaveras, J.C., Laiz, L., Saiz-Jimenez, C., Bedoya, J. y Luque, L. (2003): Biomediated precipitation of calcium carbonate metastable phases in hypogean environments. *Geomicrobiology Journal* 20: 491-500.
- [35] Sánchez-Moral, S., González, J.M., Cañaveras, J.C., Cuezva, S., Lario, J., Cardell, C., Elez, J., Luque, L. y Saiz-Jiménez, C. (2006). Procesos de precipitación mineral bioinducidos en sistemas kársticos subterráneos: breve revisión y nuevas tendencias. *Estudios Geológicos* 62 (1): 43-52.
- [36] Hoyos, M., Sánchez-Moral, S., Sanz Rubio, E. y Cañaveras, J.C. (1998). *Informe sobre las alteraciones de los materiales volcánicos encajantes del Complejo Troglodita de Galdar (Gran Canaria)*. Informe inédito. Cabildo de Gran Canaria.
- [37] Sánchez-Moral, S., García-Guinea, J., Sanz-Rubio, E., Cañaveras, J.C. y Onrubia-Pintado, J. (2002). Mortars, pigments and saline efflorescences from Canarian pre-Hispanic constructions (Galdar, Grand Canary Island). *Construction and Building Materials* 16: 241-250.
- [38] Sánchez-Moral, S., Cañaveras, J.C., Benavente, D. y Cuezva, S. (2005). *Determinación de rangos microclimáticos óptimos (temperatura, humedad y anhídrido carbónico) para minimizar los procesos de*

deterioro de soporte y pinturas de la Cueva Pintada de Gáldar. Informe para La Consejería de Cultura y Patrimonio Histórico del Cabildo de Gran Canaria.

[39] Benavente, D., Cañaveras, J.C., Cuezva, S., Laiz, L. y Sanchez-Moral, S. (2008). Experimental definition of microclimatic conditions based on water transfer and porous media properties for the conservation of Prehistoric constructions: Cueva Pintada at Galdar, Gran Canaria, Spain. *Environmental Geology*. (En prensa).

[40] Albertano, P., Moscone, D., Palleschi, G., Hermosin, B., Saiz-Jimenez, C., Sanchez-Moral, S., Hernandez-Marine, M., Urzi, C., Groth, I., Schroeckh, V., Saarela, M., Mattila-Sandholm, T., Gallon, J.R., Graziottin, F., Bisconti, F. y Giuliani, R. (2003): Cyanobacteria attack rocks (CATS): Control and preventive strategies to avoid damage caused by cyanobacteria and associated microorganisms in Roman Hypogean Mounments. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 151-162. Lisse: Balkema.

[41] Sánchez-Moral, S., Garcia-Guinea, J., Luque, L., Gonzalez, R. y López-Arce, P. (2004). Carbonation kinetic in roman-like lime mortars. *Materiales de Construcción* 275: 23-37.

[42] Sánchez-Moral, S., Luque, L., Soler, V., Cañaveras, J.C., Garcia-Guinea, J. y Aparicio, A. (2005). Lime-pozzolana mortars in Roman Catacombs: composition, structures and restoration. *Cement and Concrete Research* 35: 1555-1565.

[43] Sánchez-Moral, S., Luque, L., Cuezva, S. y Soler, V. (2004). Environmental modifications induced by visitors in San Callixtus Roman catacomb (Rome, Italy). En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Air Pollution and Cultural Heritage*: 183-190. Lisse: Balkema.

[44] Sanchez-Moral, S., Bedoya, J., Luque, L., Cañaveras, J.C., Jurado, V., Laiz, L. y Saiz-Jimenez, C., (2003). Biomineralization of different crystalline phases by bacteria isolated from catacombs. En C. Saiz-Jimenez (ed.) *Molecular Biology and Cultural Heritage*: 179-185. Lisse: Balkema.

[45] Sánchez-Moral, S., Luque, L., Cañaveras, J.C., Laiz, L., Jurado, V., Hermosin, B. y Saiz-Jimenez, C. (2004). Bioinduced barium precipitation in San Callixtus and Domitilla Catacombs. *Annals of Microbiology* 54: 1-12.

[46] Sánchez-Moral, S., Luque, L., Cuezva, S., Soler, V., Benavente, D., Laiz, L., Gonzalez, J.M. y Saiz-Jimenez, C. (2005). Deterioration of building materials in Roman catacombs: The influence of visitors. *Science of the Total Environment* 349: 260-276.

ÍNDICE DE AUTORES

- Almagro, A., 87
Álvarez de Buergo, M., 217
Armbruster, B., 129
Aza, S. de, 67
Barreiro, D., 119
Benavente, D., 217
Bernabéu, A., 217
Blanco-Varela, M.T., 35
Cámara, B., 183
Cañamares, M.V., 169
Cañaveras, J.C., 240
Capel, F., 67
Carmona, N., 49
Castillejo, M., 159
Criado, E., 67
Criado-Boado, F., 1, 119
Cuezva, S., 240
de los Ríos, A., 183
Domingo, C., 169
Duran, A., 15
Fernández Cortés, A., 240
Fort, R., 217
Franquelo, M.L., 15
García del Cura, M.A., 217
García-Heras, M., 49
García-Ramos, J.V., 169
Gaspard, S., 159
Gonzalez Grau, J.M., 197
Herrera, L.K., 15
Herrero Fernández, H., 15
Jiménez de Haro, M.C., 15
Jurasekova, Z., 169
Justo, A., 15
Martin, M., 159
Martínez-Martínez, J., 217
Martínez-Ramírez, S., 35
Montero Ruíz, I., 129
Navarro, J., 87
Odriozola, C., 15
Orejas, A., 143
Orihuela, A., 87
Oujja, M., 159
Parcero-Oubiña, C., 119
Pascual, C., 67
Perea, A., 129
Pérez-Monserrat, E., 217
Perez-Rodriguez, J.L., 15
Puertas, F., 35
Recio, P., 67
Rovira Llorens, S., 129
Ruíz del Árbol, M., 143
Saiz-Jimenez, C., vii, 197
Sánchez-Cortés, S., 169
Sánchez Moral, S., 240
Sanchez-Palencia, F.J., 143
Sastre, I., 143
Sigüenza, B., 15
Utrero Agudo, M.A., 99
Valle, F.J., 67
Varas, M.J., 217
Vázquez-Calvo, M.C., 217
Villegas, M.A., 49
Walczak, M., 159
Wierzchos, J., 183,

LÁMINAS

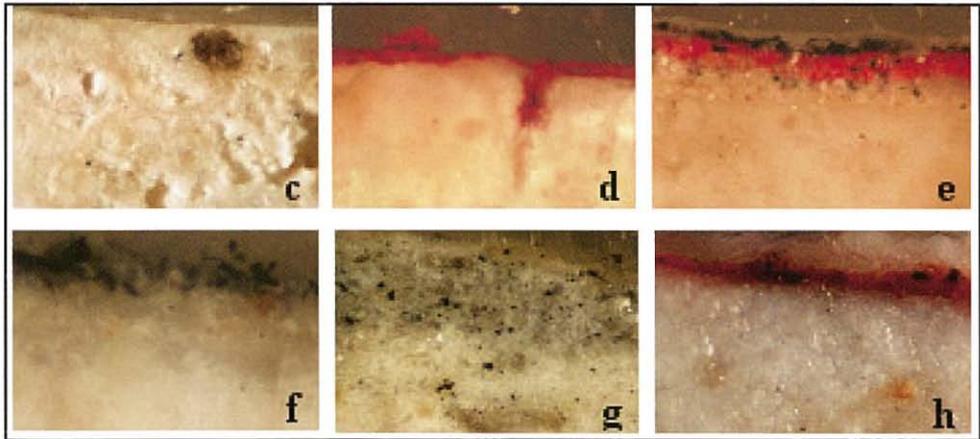


Figura 7



Figura 12

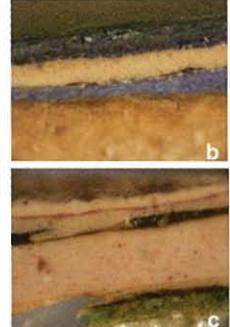


Figura 13

Leyenda

Figura 7. (a) Patio de las Doncellas de los Reales alcázares de Sevilla (b) Ornamentación de los siglos XIV y XV-XVI (c-h) Diferentes estratos pictóricos encontrados en esta ornamentación.

Figura 12. (a) Bóveda de la Sala Capitula del Ayuntamiento de Sevilla (b) Estratigrafía dorada de la bóveda (c) Inscripciones de color negro presentes en la decoración del techo.

Figura 13. (a) Talla policromada de Nuestra Señora Santa Ana de Dos Hermanas Sevilla (b) Estratigrafía de la túnica azul de la virgen donde se observan dos capas de policromía azul, la inferior a base de blanco de cinc y blanco de titanio, coloreado con lazurita y el estrato superior a base de azul ultramar detectándose en la zona superficial un pigmento verde de cromo y un silicato magnésico, probablemente talco. (c) Sobre la policromía verde original (resinato de cobre) se observan diversos estratos de color blanco y de carnaduras correspondientes a intervenciones posteriores, las primeras conteniendo albayalde, bermellón, hematites y laca roja y las más recientes blanco de titanio y blanco de cinc también y con aglutinante oleoso.

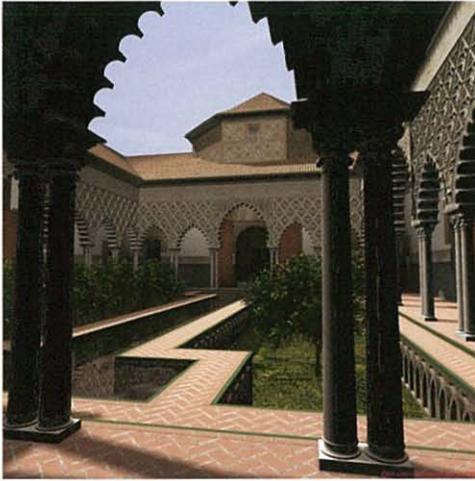


Figura 1



Figura 2



Figura 3



Figura 4



Figura 5

Leyenda

Figura 1. Reconstrucción virtual del patio de las Doncellas del palacio de Pedro I del Alcázar de Sevilla.

Figura 2. Restauración de la fachada del palacio de Pedro I del Alcázar de Sevilla.

Figura 3. Excavación arqueológica en el patio de la casa morisca de la calle de San Buenaventura.

Figura 4. Yesería de la casa morisca de la calle de San Buenaventura de Granada.

Figura 5. a y b. Restauración de elementos de carpintería de la casa morisca de la calle de San Martín de Granada.

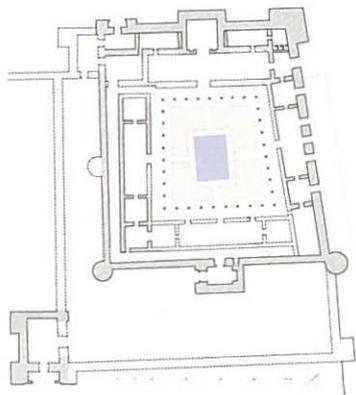


Figura 6



Figura 7



Figura 8

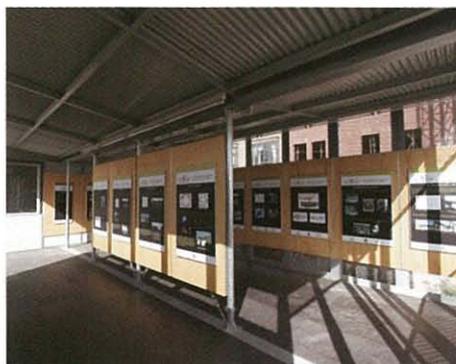


Figura 9

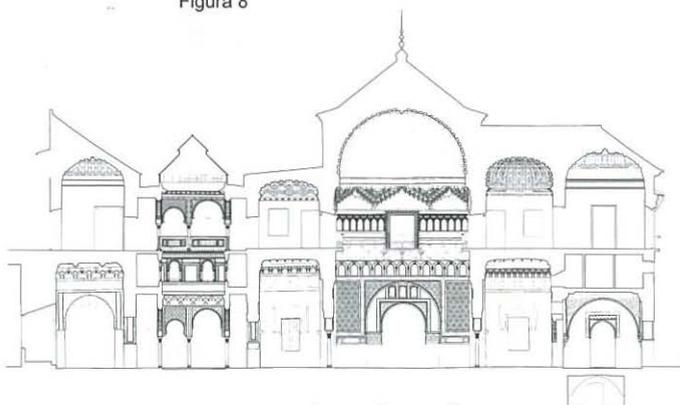


Figura 10

Leyenda



Figura 11

- Figura 6. Planta del Alcázar de Guadalajara.
Figura 7. Excavación arqueológica y pabellón de explicación del monumento en el Alcázar Real de Guadalajara.
Figura 8. Interior del Alcázar de Guadalajara con las excavaciones y la pasarela para visitantes.
Figura 9. Paneles explicativos en el interior del pabellón del Alcázar Real de Guadalajara.
Figura 10. Sección del palacio de Pedro I en el Alcázar de Sevilla.
Figura 11. Toma de muestras en la fachada del palacio de Pedro I en el Alcázar de Sevilla.



Figura 12



Figura 13



Figura 14



Figura 15

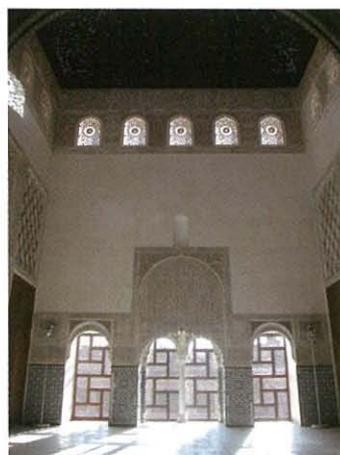


Figura 16

Leyenda

Figura 12. Laboratorio de fotogrametría del LAAC

Figura 13. Lectura de paramentos en el Cuarto Real de Santo Domingo de Granada

Figura 14. Restauración de la cubierta del Cuarto Real de Santo Domingo de Granada

Figura 15. Descubrimiento de yeserías ocultas en el Cuarto Real de Santo Domingo

Figura 16. Interior de la *qubba* del Cuarto Real de Santo Domingo ya restaurada

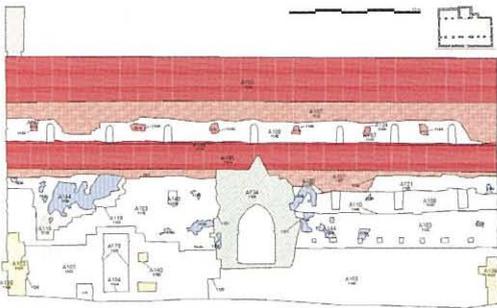


Figura 2

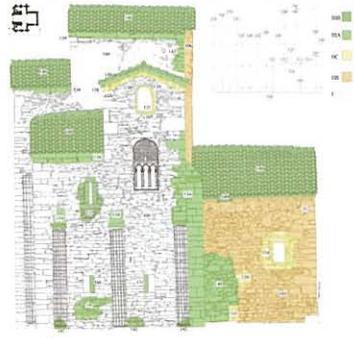


Figura 4

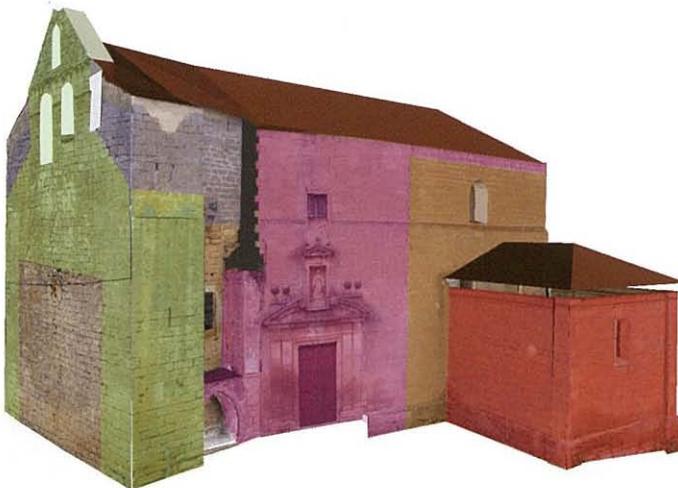


Figura 7

Leyenda

Figura 2. Vista y lectura del alzado meridional de Idanha-a-Velha.

Figura 4. Vista y lectura del alzado meridional de San Miguel de Lillo.

Figura 7. Etapas constructivas de Nuestra Señora de la Asunción de Viñaspre.

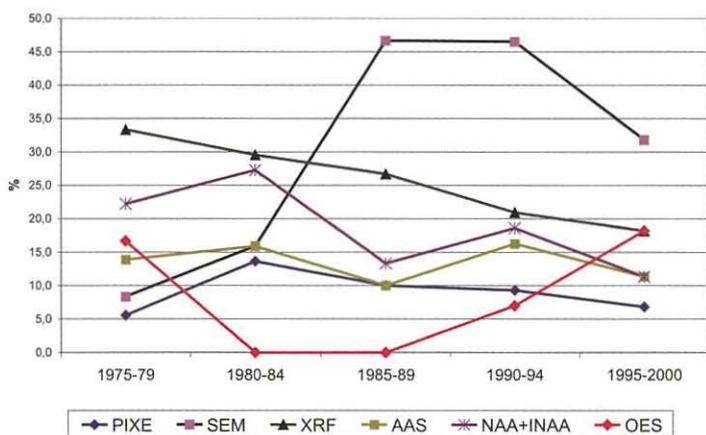


Figura 1



Figura 3



Figura 4

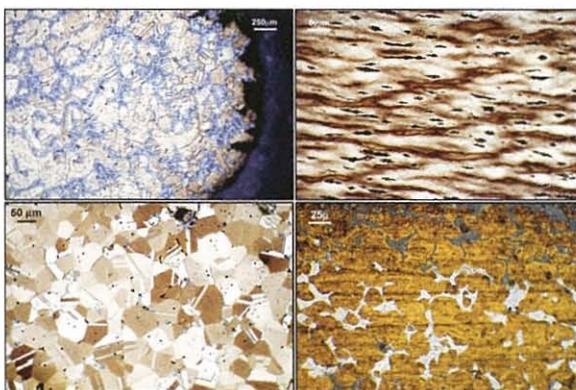


Figura 5

Leyenda

Figura 1. Gráfico que muestra la evolución de las técnicas de análisis más utilizadas en los estudios internacionales de arqueometalurgia en el periodo 1975-2000, según [1]. Se aprecia el peso que adquiere la microscopía electrónica de barrido en la década de los 90.

Figura 3. Figura antropomorfa en bronce con máscara de oro procedente de Cádiz, delante del detector en el acelerador del CMAM, UMAM. Siglo VIII a.C.

Figura 4. Macro de los componentes estructurales en una de las placas del Tesoro de El Carambolo (Sevilla). Siglo VII a.C.

Figura 5. Montaje de micrografías de bronce antiguo. De izquierda a derecha y de arriba a abajo: Hacha plana del Bronce Tardío, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío y recocido (yacimento de la Fábrica de Euskalduna, Madrid). Hacha plana del Calcolítico, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío (yacimento de Cabezo Juré, Alosno, Huelva). Espada del Bronce Final, mostrando estructura de colada seguida de forja en frío y recocido (depósito de la Ría de Huelva). Molde metálico de hacha de talón, mostrando áreas ricas en Sn (color plateado) en un bronce de alto contenido en estaño (yacimento de Linares de Riofrío, Salamanca).

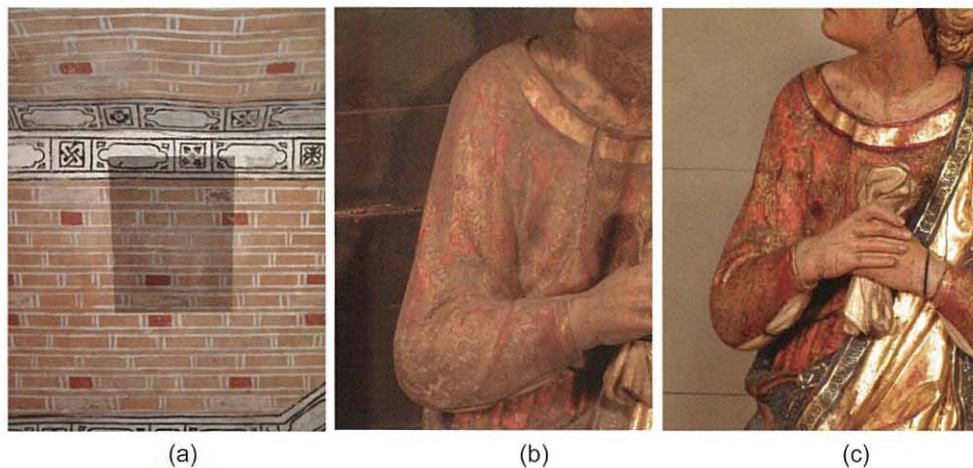


Figura 1



Figura 2

Legenda

Figura 1. (a)Techo del coro de la iglesia de Santa Tecla tras la limpieza láser mostrando una zona rectangular sin limpiar; estatua de la Capilla de San Miguel decorada con brocados aplicados en relieve antes (b) y después (c) de la limpieza láser.

Figura 2. Mano en terracota (a) y detalle de una estatua parcialmente restaurada tras la limpieza láser del tímpano de la Puerta de Palos de la Catedral de Sevilla (b).

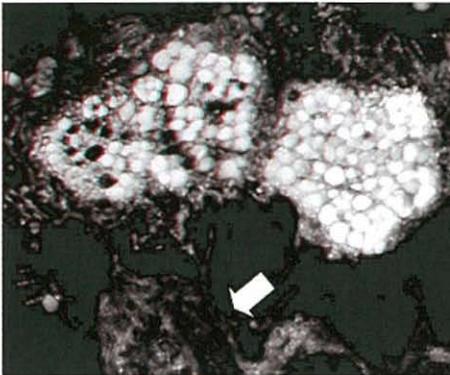


Figura 8

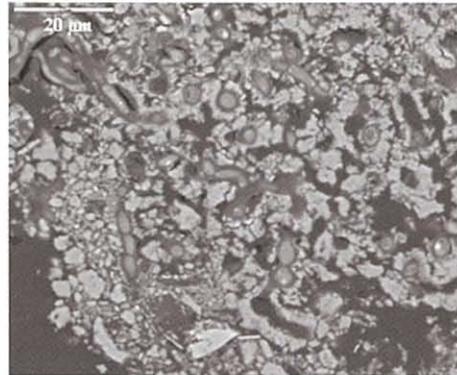


Figura 9

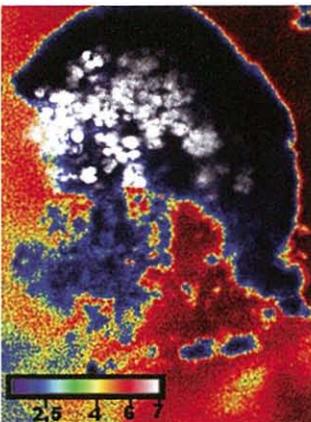
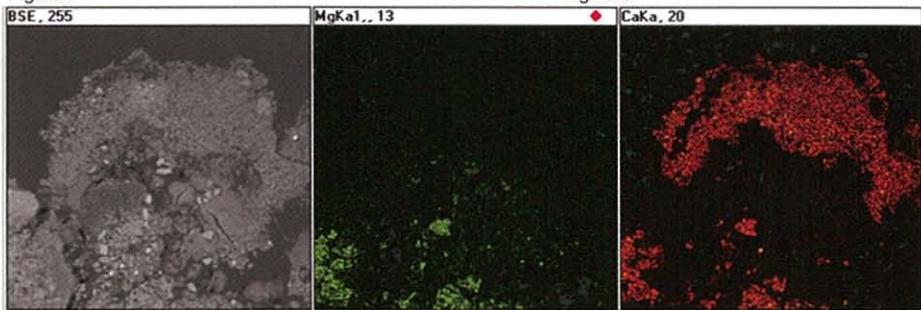


Figura 11

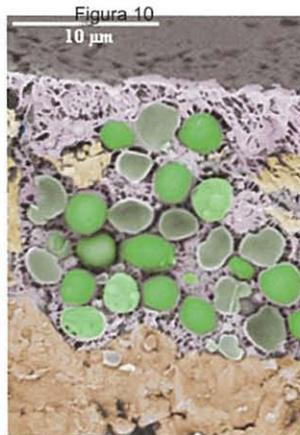


Figura 12



Figura 13

Leyenda

Figura 8. Imagen tridimensional obtenida por CSLM de la colonización de una dolomía por un talo liquénico mostrando la penetración del micobionte en el sustrato (flecha).

Figura 9. Imagen de SEM-BSE de hifas fúngicas del líquen *Caloplaca teichoyta* rodeadas de depósitos minerales en la piedra de la Iglesia de San Martín (Segovia).

Figura 10. Imagen de SEM-BSE y mapas de distribución de calcio (Ca) y magnesio (Mg) obtenidos por EDS del líquen mostrado en la Figura 9.

Figura 11. Imagen de CSLM de un talo liquénico crustáceo teñido con el indicador de pH fluorescente CI-NERF. La escala indica los colores correspondientes a los distintos pH.

Figura 12. Imagen de LTSEM de una cavidad presente en una dolomía de la Iglesia de la Veracruz (Segovia) ocupada por un biofilm hidratado de algas verdes, donde se ha coloreado en verde las células, en marrón la piedra y en rosa la red de EPS.

Figura 13. Imagen de LTSEM de un talo liquénico colonizando dolomías de la Iglesia de la Veracruz. Las flechas indican los fragmentos minerales inmersos en la red de EPS (asteriscos).



Figura 1



Figura 4



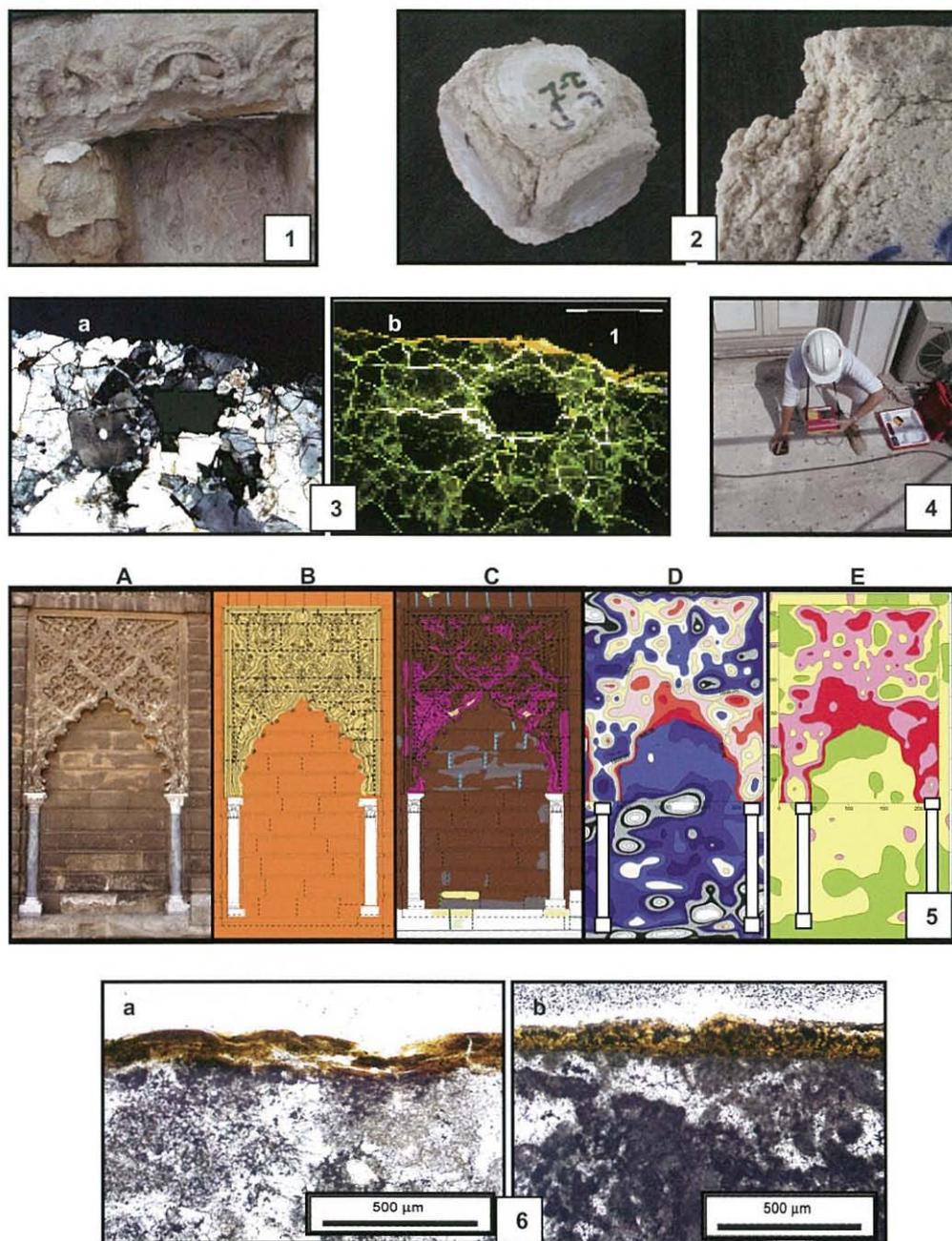
Figura 5

Leyenda

Figura 1. Mural de La Despedida. Monasterio de Santa María de la Rábida, Huelva. Deterioro producido por la presencia de eflorescencias y la colonización del hongo *Cladosporium sphaerospermum* (manchas verdes). El crecimiento del hongo produjo exfoliaciones de la capa pictórica.

Figura 4. Mosaico de Tellus, Casa de los Pájaros, Conjunto Arqueológico de Itálica. Teselas vítreas colonizadas por líquenes. El crecimiento de líquenes endolíticos en el interior de las teselas verdes y azules aparece como perforaciones, mientras que las teselas amarillas, con elevado contenido en plomo, presentan un deterioro químico en forma de exfoliaciones.

Figura 5. Mosaico del Planetario, Conjunto Arqueológico de Itálica. La deficiente restauración con material inapropiado (teselas obtenidas a partir de trozos de vidrio verde de botella) produjo una colonización de musgos bajo ellas, como consecuencia de la retención de humedad bajo la tesela y la penetración de los rayos solares. El crecimiento conducía al desprendimiento de la tesela.



Leyenda

Figura 2. 1. Deterioro por tratamiento de consolidación e hidrofugación. 2. Envejecimiento acelerado por cristalización de sales de la Piedra de Redueña. 3. Aspecto de granito al microscopio de polarización (a) y microscopio de fluorescencia (b). Se aprecia la figuración sufrida por acción del fuego. 4. Prospección magnetométrica. 5. Arcada inferior de la Fachada de D. Pedro I, en el Alcázar de Sevilla. A- Fotografía de la arcada. B- Disposición de materiales C- Daños observados. D- Distribución de la velocidad de propagación de ultrasonidos. E- Establecimiento del grado de intervención. 6. a) Aspecto de pátina histórica sobre caliza visto a través de microscopio de polarización. b) Aspecto de pátina diseñada.

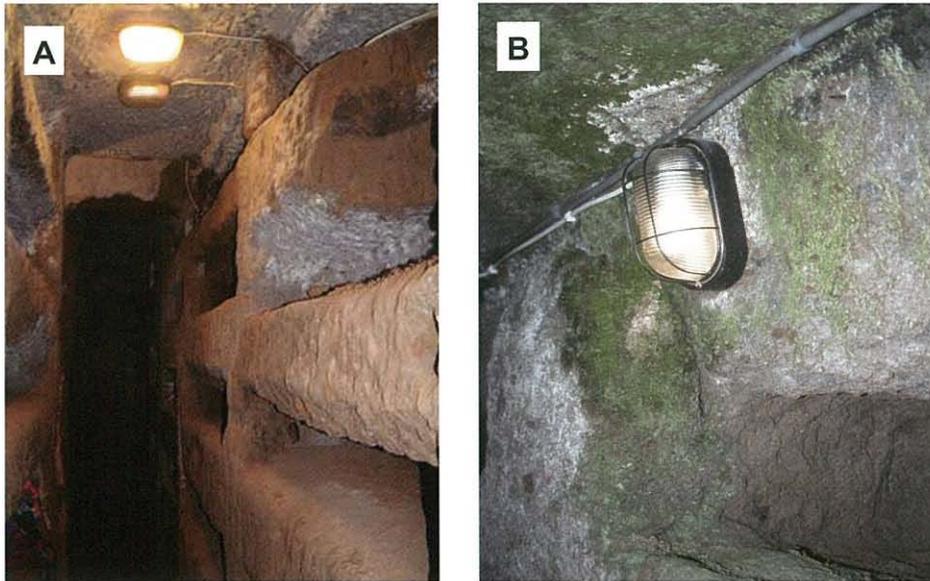


Figura 9

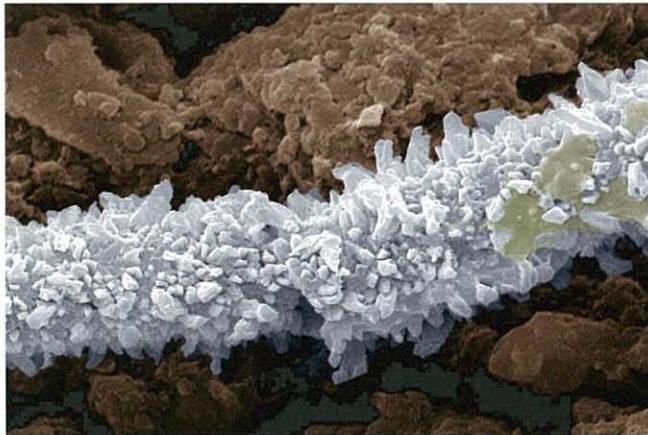


Figura 10

Leyenda

Figura 9. (a) Biofilm blanco compuesto por actinobacterias cubriendo los paramentos horizontales elevados en uno de los corredores de la a catacumba de San Calixto. (b) Biofilm verde asociado a una de las lámparas que iluminan un cubículo de la catacumba de Domitilla.

Figura 10. Microfotografía de scanning ambiental en falso color, mostrando la calcificación de una vaina de cianobacteria muestreada junto a un punto de luz en la catacumba de Domitilla.

