

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***

¹*Laboratorio Petrología Aplicada Unidad Asociada (CSIC- UA)*

²*Departamento de Petrología y Geoquímica Facultad de Geología (UCM), 28040 Madrid*

³*Departamento 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	
Comunidad Valenciana	Alicante Valencia	10 2	12
Junta de Castilla-La Mancha	Toledo	5	8
	Cuenca	2	
	Guadalajara	1	

Autonomía	Provincia	Nº	Total
Junta de Andalucía	Sevilla	3	5
	Granada	1	
	Jaén	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	
Tipología	nº
Catedrales	7
Monasterios	8
Colegiatas	2
Conventos	1
Iglesias	8
Otros	4
Total	30

PATRIMONIO CIVIL O MILITAR			
Tipología	nº	Tipología	nº
Palacios	11	Murallas	3
Museos	3	Castillos	3
Edificios	9	Fuentes	2
Puentes	5	Yacimientos Arqueológicos	11
Acueductos	2	Otros	10
Puertas	5		
			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 perteneciente 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 hacia 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 las 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 períodos 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. Mezquiriz (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] Menduiña 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-Heineman.
- [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 *Simposios: III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología*. Tomo 1: 225-234. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- [9] Fort, R., Bustillo, M., Lopez 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., Alvarez 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 Riofrio (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 diagnosis 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., Álvarez 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., Álvarez 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., Maurício, 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., Álvarez 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., Álvarez 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] Menduiña, 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 Menduiña, J. (2005): *Canteras Históricas de la Comunidad de Madrid*. [<http://www.madrimsd.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., Zafirooulos, 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] Vazquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M., Fort, R., Gómez-Tubio, 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. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras y C. Vazquez-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] Alvarez 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] Vazquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M., y Fort, R. (2006): Patinas in the Architectural Heritage of Lerma, Burgos (Spain). En: R. Fort, M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras y C. Vazquez-Calvo (eds) *Heritage, Weathering and Conservation* Vol. 2: 969-974. Londres: Taylor and Francis.

[123] Vazquez-Calvo, C., Alvarez de Buergo, M. y Fort, R. (2007): Overview of recent knowledge of patinas on stone monuments: the Spanish experience. En R. Prikrýl 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] Perez-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.

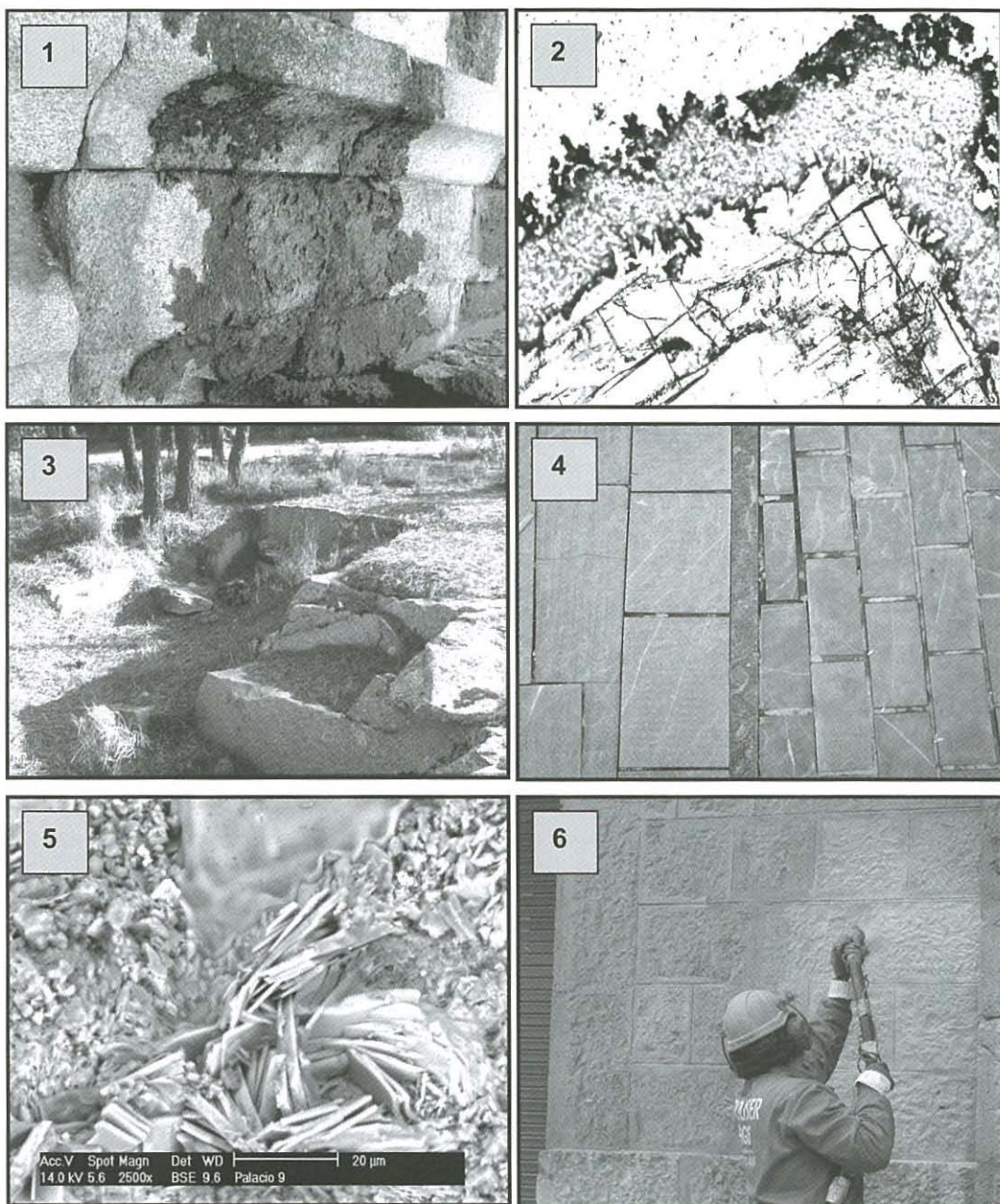


Figura 1. 1. Costra negra sobre granito. 2. Costra negra de yeso con procesos de disolución y figuración de feldespatos. Microscopio de polarización. 3. Cantera antigua de granito utilizada para el abastecimiento de piedra en el Real Monasterio de San Lorenzo de El Escorial (Madrid). 4. Piedra de pavimentación en Peñíscola (Castellón). 5. Antigo tratamiento de ceras con procesos de yesificación sobre piedra granítica. 6. Prueba de limpieza en fachada de caliza.

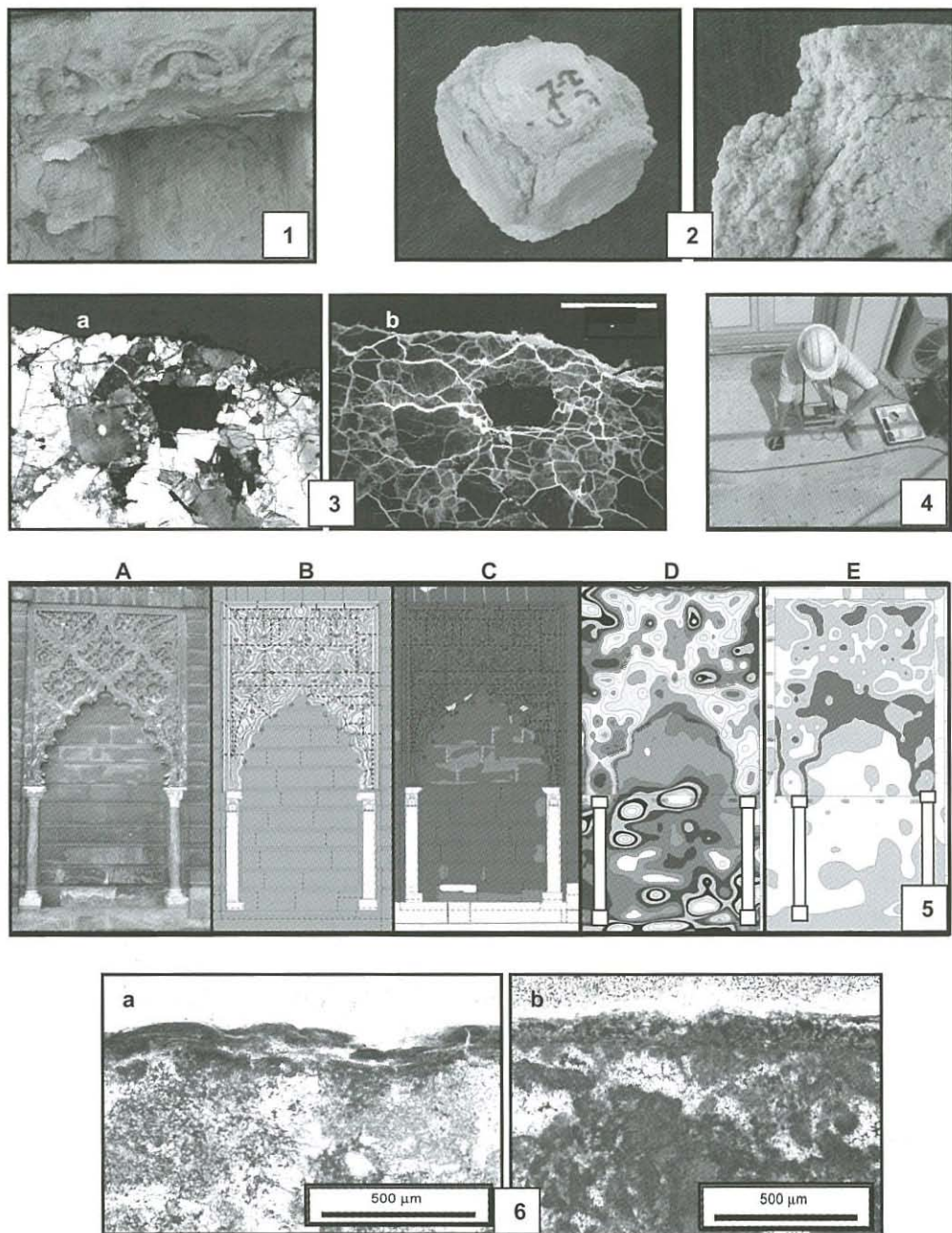


Figura 2. 1. Deterioro por tratamiento de consolidación e hidrofugación. 2. Envejecimiento acelerado por cristalización de sales de la Piedra de Redueña. 3. Aspecto de granito al microscopio de polarización (a) y microscopio de fluorescencia (b). Se aprecia la figuración sufrida por acción del fuego. 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.