

Los monumentos como laboratorios de geología: Actividades didácticas para el estudio del patrimonio arquitectónico desde las Ciencias de la Tierra

Monuments as geology laboratories: Educational activities for the study of the architectural heritage from Earth Sciences

JAVIER MARTÍNEZ-MARTÍNEZ

Instituto Geológico y Minero de España, Ríos Rosas, 23, Madrid. E-mail: javier.martinez@igme.es

Resumen El estudio del patrimonio arquitectónico desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra constituye una actividad didáctica que aprovecha el atractivo visual, histórico y plástico de los monumentos para ampliar la visión aplicada de la Geología. La observación de las rocas empleadas en la construcción de un monumento, identificar sus componentes petrológicos, clasificar el patrón de deterioro que muestra y ubicar todos estos aspectos en una cartografía temática del edificio, contribuye a consolidar los conceptos geológicos vistos en el aula y potencia la capacidad de observación, el pensamiento crítico y la transversalidad en la educación. En este trabajo se proponen diferentes actividades para que el alumnado se aproxime al estudio geológico de los monumentos, proporcionando esquemas y materiales con la finalidad de que lo pueda llevar a cabo con autonomía. Además, se proponen actividades complementarias que se pueden incluir a modo de debate en el aula para favorecer el intercambio de experiencias, ideas y opiniones entre los estudiantes.

Palabras clave: Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, taller didáctico, petrología, alteración, rocas, monumentos.

Abstract *The study of the architectural heritage from the point of view of Earth Sciences constitutes an interesting educational activity based on the visual, aesthetic, and historic value of monuments. In this paper, different activities are proposed in order to facilitate the students' geological study of the monuments. The proposed activities include: the observation of the rocks used as building materials, the identification of their petrologic components, the classification of the different decay patterns developed on the rock and the representation of all this information in a cartographic map of the monument. All these points contribute to strengthen the geological concepts studied previously as well as to develop the observation capacity, the critical reasoning and the cross-curricular connections. Moreover, at the end of this work several supplementary questions are suggested with the purpose of introducing them as discussion topics in classroom in order to encourage the exchange of experiences, ideas and opinions among the students.*

Keywords: *Geoscience teaching, educational workshop, petrology, weathering, rocks, monuments.*

INTRODUCCIÓN

Es indiscutible la capacidad divulgativa y didáctica que poseen los monumentos de nuestros pueblos y ciudades. A través de su atractivo visual y plástico se pueden transmitir infinidad de conceptos históricos, artísticos, constructivos, etc. En este sentido, los monumentos son como caleidoscopios multidisciplinares, en los que variando la perspectiva de estudio te devuelven infinidad de

información interrelacionada. La lectura del patrimonio arquitectónico desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra permite aprovechar el gran potencial didáctico de la información geológica que encierran sus muros de piedra (Vázquez Calvo *et al.*, 2008; Pérez-Monserrat *et al.*, 2013; Morgan, 2016). La incorporación de la perspectiva geológica al estudio caleidoscópico de los monumentos enriquece a ambos. Por una parte, el estudio geológico de los materiales de construcción enriquece sobre-



manera el conocimiento global del monumento. Por otra, la aplicación de conceptos geológicos a casos de estudio multidisciplinares potencia la consolidación de las ideas y amplía la visión aplicada de la Geología.

Los muros de sillares y mampostería, las columnas y esculturas de piedra, las molduras y zócalos de rocas ornamentales, se pueden considerar excelentes afloramientos ('afloramientos arquitectónicos' o 'afloramientos antrópicos') donde estudiar, explicar y comprender múltiples conceptos de Ciencias de la Tierra. Las superficies lisas y regulares de los bloques de piedra ofrecen muchas veces secciones idóneas donde observar e identificar componentes petrográficos, texturas, estructuras sedimentarias, etc. (Figs. 1b, 1e y 1g). En ocasiones, la erosión superficial de la piedra favorece la obtención de vistas en relieve de dichos componentes y/o estructuras, aumentando su valor didáctico (Figs. 1d y 1f). Además, las esquinas y los elementos exentos (columnas, esculturas, etc.) ofrecen una visión tridimensional de las texturas y/o estructuras, pudiéndolas estudiar en varias direcciones (Figs. 1a y 1c).

El análisis geológico del patrimonio arquitectónico no sólo se limita al estudio descriptivo de las rocas, sino que también se pueden interpretar procesos dinámicos que actúan sobre los materiales (procesos de deterioro) a partir de las señales que dejan en las rocas (Gomez-Heras y McCabe, 2015). Las formas de alteración desarrolladas en los monumentos pueden llegar a ser espectaculares, y para explicar su formación se debe recurrir a los mismos procesos implicados en el modelado geomorfológico de afloramientos naturales.

En este trabajo se presenta una metodología simplificada para el estudio de los monumentos desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra, combinando el trabajo en el aula y sesiones de observación directa en el monumento (fuera del aula). Esta práctica podría constituir una actividad formativa interesante para alumnos de Bachillerato (cursos preuniversitarios) y, especialmente, dentro de los planes docentes de Grados Universitarios relacionados con materiales de construcción y/o restauración (por ejemplo, Geología, Bellas Artes, Arquitectura, Ingeniería de la Edificación, etc.). El grado de complejidad de esta actividad es variable y se debe regular al nivel educativo en el que se

imparta la actividad. En primer lugar, la actividad poseerá un grado de complejidad inicial que vendrá impuesto por las características del propio monumento. La elección de un caso de estudio que resulte interesante, didáctico y con una complejidad adecuada será esencial para el desarrollo y éxito de la práctica. Por ello, este artículo comienza con una breve exposición de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar el monumento sobre el que trabajar. En segundo lugar, la dificultad de la actividad puede ser modulada por el profesorado, adaptando la rigurosidad y exigencia al nivel de conocimiento del alumnado. En la segunda parte de este artículo se proponen diferentes actividades con diferentes enfoques y niveles de complejidad. Por último, el artículo finaliza con una propuesta de actividades a realizar en el aula tras el análisis del monumento que contribuyen a adquirir una visión geológica más completa de la relación que existe entre el monumento, la piedra de construcción y las condiciones ambientales de exposición.

TRABAJO PREVIO EN EL AULA: PREPARACIÓN DE LA ACTIVIDAD

Consideraciones previas a la elección del monumento con el que trabajar

Como se ha mencionado anteriormente, la complejidad de esta actividad es variable, y depende tanto del tipo de material que el alumno deba elaborar a partir del estudio del monumento (desarrollado en la siguiente sección), como de las características del propio monumento. El monumento sobre el que trabajar puede estar asignado directamente por el profesor, o bien quedar a elección libre del propio alumno. En cualquier caso, se propone tener en cuenta los siguientes puntos a la hora de establecer el caso de estudio:

¿Todo el monumento? ¿Una fachada? ¿O solo algún elemento puntual?

Las dimensiones del elemento a analizar pueden ser un problema a la hora de trabajar en detalle. Si se va a realizar un atlas fotográfico global de las diferentes formas de alteración que muestran los materiales de construcción (actividad 1 de la siguiente sección), entonces se recomienda abarcar

Fig. 1. Ejemplos de elementos reconocibles cuando se estudia el patrimonio arquitectónico desde la perspectiva de la Tierra. (a) columnas de mármol en las que se puede estudiar la distribución tridimensional de la foliación (marcada con líneas punteadas en rojo) y fracturación; (b) sección transversal de un equinodermo (marcado con flecha) en un sillar de calcirrudita; (c) visión tridimensional de una estructura laminada en calcarenita; (d) sillar con estructura diagenética (anillo de Liesegang) resaltado por erosión diferencial; (E) textura porfídica de un sillar de granodiorita (fenocristal marcado con flecha); (f) visión tridimensional de un coral fósil como resultado de la erosión preferencial de la matriz; (g) xenolito (gabarro) en un sillar de granito.

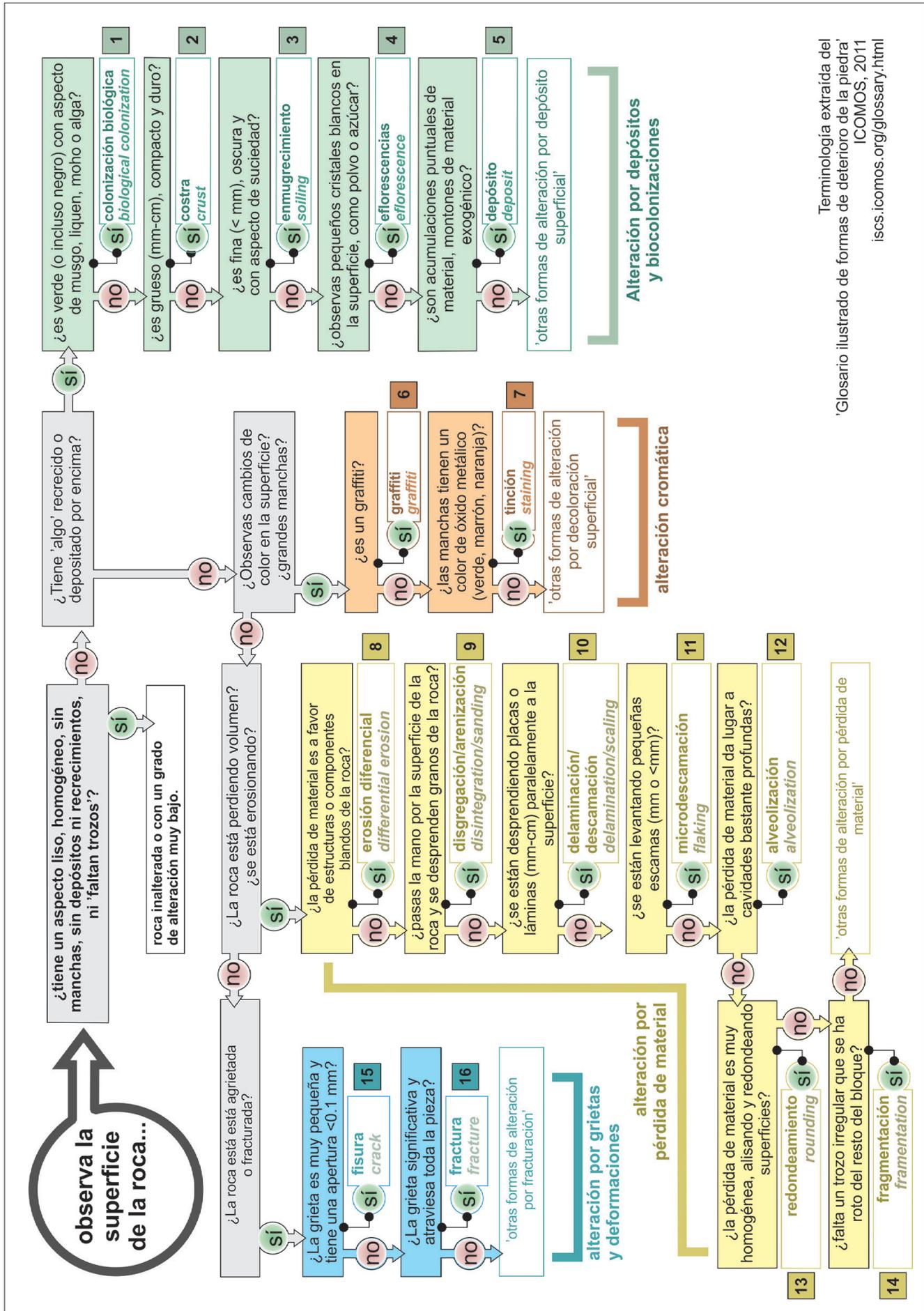


Fig. 2. Diagrama de flujo para su uso en el reconocimiento de formas de alteración de la piedra en el monumento. Este diagrama recoge algunas de las alteraciones más frecuentes en el patrimonio. Se puede consultar una relación mucho más completa en el glosario ilustrado disponible en [icomos.org/glossary.html](https://www.icomos.org/glossary.html).

grandes superficies (p.ej. todas las fachadas de un monumento, varios edificios, etc.). Si por el contrario, se va a realizar cartografías en detalle (actividad 2), quizá sea más recomendable abarcar una superficie menor. Tanto en una situación como en otra, se debe tener en cuenta que habitualmente la superficie de estudio accesible al alumno suele quedar limitada a los primeros 1'5 ~ 2 metros de altura desde el suelo. Las partes más elevadas se trabajarían, por lo tanto, a partir de una observación general a distancia.

¿Cantidad o diversidad?

Para que la actividad resulte interesante y didáctica, es recomendable que el elemento a estudiar muestre una rica diversidad, y mucho mejor si además de diversas 'cosas', presenta muchos ejemplos de esas 'cosas'. La diversidad puede estar representada por: 1) desarrollo de variadas formas de alteración; 2) existencia de varios niveles de intensidad en el grado de erosión; 3) identificación de diferentes variedades litológicas empleadas como materiales de construcción. Cuanto mayor sea la variabilidad de aspectos a estudiar y mayor sea también la cantidad de ejemplos disponibles, más didáctico e interesante será el caso de estudio, pero también más complejo. Por ello, se recomienda que en casos de elevada complejidad, la superficie de trabajo sea reducida.

¿Interior o exterior?

Esta actividad se puede realizar tanto en paramentos exteriores (fachadas, portadas, torres, etc) como en elementos interiores (altares, suelos, zócalos, etc). Si bien, en los interiores la intensidad del deterioro y la variabilidad de las formas de alteración suele ser menor que en exteriores (aunque no tiene por qué ser siempre así), la variabilidad de litologías empleadas en el ornamento de espacios interiores puede llegar a ser mucho mayor, e incluso con materiales más exóticos y diferentes a los que encontramos en nuestro entorno.

Revisión de Conceptos Previos en el Aula

Previamente a la sesión de observación directa en el monumento, es necesario que el alumno se familiarice con los conceptos con los que va a trabajar.

Identificación de litologías en el monumento

Para el máximo aprovechamiento de estas actividades, es conveniente que el alumnado haya realizado talleres prácticos de reconocimiento de rocas en el aula (Franco y Gonzalo, 2000; Rodrigo Sanz *et al.*, 2008). De esta forma, podrá aplicar los conocimientos adquiridos en el reconocimiento de las rocas empleadas en la construcción del patrimonio arquitectónico. En el caso de que no exista posibilidad de realizar dichos talleres de reconocimiento de rocas, el profesor deberá introducir al alumno en las principales rocas empleadas en el monumento que va a estudiar, sus características geológicas y sus rasgos petrológicos más distintivos.

Identificación de Formas de Alteración de Rocas

El reconocimiento, análisis y clasificación de las diferentes formas que puede desarrollar una

roca al alterarse es un aspecto complejo. Existen multitud de tipos básicos de alteración y en la realidad se pueden desarrollar infinidad de combinaciones de estos tipos básicos simultáneamente. Para tratar de facilitar el proceso de identificación, en el diagrama de flujo de la figura 2 se propone un esquema simplificado que puede emplear el alumno para su trabajo individual en el monumento. Además, se recomienda el uso y consulta de la guía ilustrada publicada por el *International Council on Monuments and Sites* (ICOMOS, 2011), en la que se incluye la terminología oficialmente aceptada para la descripción de las formas de alteración de las rocas, así como una colección de fotografías ilustrativas de ejemplos emblemáticos de cada una de ellas. Esta guía ilustrada es de libre uso y se encuentra disponible en la página web: icsc.icomos.org/glossary.html.

La tabla I incluye una breve revisión de los tipos básicos de alteración más frecuentes en el patrimonio arquitectónico sobre los que se centra el diagrama de flujo de la figura 2.

Es conveniente que el docente dedique una parte de la sesión teórica en el aula a explicar las principales formas de alteración de rocas, invitando al alumno a consultar simultáneamente la guía ilustrada de ICOMOS. Es importante que el alumno se encuentre familiarizado tanto con la terminología como con el uso de la guía y del diagrama de flujo, los cuales convendría que llevara impresos y/o descargados en versión digital en sus dispositivos electrónicos de uso en campo.

TRABAJO *IN SITU* EN EL MONUMENTO

Análisis descriptivo de un monumento desde la perspectiva de las Ciencias de la Tierra: Describiendo 'lo que se ve'

En este artículo se proponen dos tipos de actividades diferentes a realizar con los alumnos: elaboración de Atlas Gráficos de Alteración y elaboración de Cartografías Temáticas.

ACTIVIDAD 1: elaboración de Atlas Gráficos de Alteración

Se propone que el alumnado elabore un Atlas Gráfico similar al elaborado por ICOMOS (2011), pero a partir de su propio material gráfico e incluyendo sus propias observaciones. En la figura 3 se muestra una posible ficha que el alumno podría rellenar de cada una de las formas de alteración observadas en el monumento.

Esta actividad permite no ceñirse a un único elemento arquitectónico de estudio (fachada, portada, etc.), sino hacer una revisión global de las formas de alteración que se observan en un monumento o en un conjunto de edificaciones. Por ello, constituye una solución interesante en aquellos entornos geográficos en los que el patrimonio arquitectónico tenga una baja capacidad didáctica, es decir, esté construido con el mismo tipo petrológico (o un número muy reducido de variedades litológicas) y que además muestre una buena durabilidad y en consecuencia una baja variabilidad de formas de alteración.

	Monumento:
	Ciudad (Provincia):
	Fecha de construcción/reconstrucción:
	Fecha de la fotografía:
	Forma de alteración observada:
Descripción:	
Litología sobre la que se desarrolla:	
Ubicación en el monumento:	

	Monumento: Vivienda particular
	Ciudad (Provincia): Morelia (Michoacán, México)
	Fecha de construcción/reconstrucción: s. XIX
	Fecha de la fotografía: septiembre 2015
	Forma de alteración observada: Alveolización
Descripción: Desarrollo de profundos alveolos (5.5 cm de profundidad). Se observan además pequeñas eflorescencias salinas, y en la parte superior del sillar hay erosión diferencial a favor de componentes	
Litología sobre la que se desarrolla: ignimbrita riolítica rosa	
Ubicación en el monumento: Sillar inferior de la jamba izquierda de la puerta de acceso a vivienda.	

Fig. 3. Ejemplo de ficha de forma de alteración con los diferentes campos que se pueden incluir.

ACTIVIDAD 2: elaboración de Cartografías Temáticas

Este tipo de actividad implica un grado mayor de complejidad y una mayor autonomía y capacidad de resolución de problemas por parte del alumnado. En este caso, y a diferencia de la actividad 1, las cartografías se centran en un único elemento arquitectónico, por lo que son especialmente interesantes en aquellos casos de estudios con cierta complejidad y variabilidad de litologías y/o formas de alteración.

Para la elaboración de las cartografías temáticas es necesario disponer de un soporte gráfico del monumento o elemento arquitectónico, que puede ser directamente una fotografía (Fig. 4b) o bien un esquema arquitectónico (Figs. 4a, 4c y 4d). En el caso de emplear una fotografía, se recomienda que esta tuviera poco contraste y poca saturación de colores para que resultara más fácil cartografiar después sobre ella. En el segundo caso, el esquema arquitectónico lo puede proporcionar el profesorado, o bien lo puede elaborar el propio alumno, lo cual es especialmente recomendable en cursos universitarios para favorecer la transversalidad de competencias. Para la elaboración de las cartografías temáticas no es necesario la elaboración de esquemas arquitectónicos excesivamente precisos, sino que en este caso, la exactitud del alzado dependerá de la exigencia del docente y de las competencias del Grado Universitario donde se imparta este taller.

La figura 4 muestran diferentes ejemplos de cartografías temáticas desarrolladas sobre diferentes soportes gráficos.

El objetivo final de las diferentes cartografías temáticas siempre es el mismo: representar la distribución espacial de uno o varios atributos a lo largo de la superficie del elemento arquitectónico estudiado. Se puede elaborar una cartografía individual para cada atributo (litología; formas de alteración; intensidad de alteración; o intervenciones) o bien realizar cartografías mixtas mediante la combinación de diferentes tramas y símbolos.

Cartografía litológica (Figs. 4a y 4c)

Para la elaboración de este tipo de cartografía, el alumnado debe identificar, en primer lugar, el material pétreo de construcción empleado y reconocer cuántas variedades litológicas existen. Los litotipos identificados se pueden caracterizar por diferencias litológicas (granito, granodiorita, caliza, dolomía, arenisca, etc.) (Fig. 4a) o bien por diferencias tex-

turales y/o composicionales (diferencias en el tamaño de cristal o en la cantidad de cuarzo en rocas plutónicas, diferencias en el contenido fósil o en la proporción matriz/cemento en rocas sedimentarias, etc.) (Fig. 4c).

Cartografía de formas de alteración (Fig. 4b).

En esta cartografía debe quedar representada cada una de las formas de alteración desarrolladas en la roca, y su ubicación dentro del caso de estudio.

Cartografía de intensidad de alteración (Fig. 4d)

La elaboración de esta cartografía puede ser interesante en aquellos monumentos con elementos pétreos muy erosionados. La metodología habitual consiste en medir en cada sillar (o en cada elemento constructivo) el retroceso máximo de la superficie respecto a la superficie original (definida por elementos próximos no erosionados). La intensidad se gradúa en una escala de 6 niveles, pudiéndose tomar como referencia estos valores (aunque es una escala arbitraria):

- Intensidad 0: no hay retroceso de la superficie (~ 0 cm).
- Intensidad 1: leve retroceso, habitualmente irregular (< 1 cm).
- Intensidad 2: retroceso moderado-bajo (entre 1 y 2.5 cm).
- Intensidad 3: retroceso moderado-alto (entre 2.5 y 5 cm).
- Intensidad 4: fuerte retroceso de la superficie (entre 5 y 10 cm).
- Intensidad 5: retroceso muy agresivo, pudiendo haber desaparecido completamente la pieza (> 10 cm).

En algunos casos, la cartografía de formas e intensidad de alteración pueden fusionarse en una única cartografía mixta, empleando diferentes colores para representar las diferentes formas de alteración observadas, y diferentes tonos de un mismo color para representar la intensidad con la que se manifiesta.

Cartografía de intervenciones

Cuando se han realizado intervenciones (restauración, reconstrucción o prevención) en el monumento a estudiar puede ser interesante realizar una

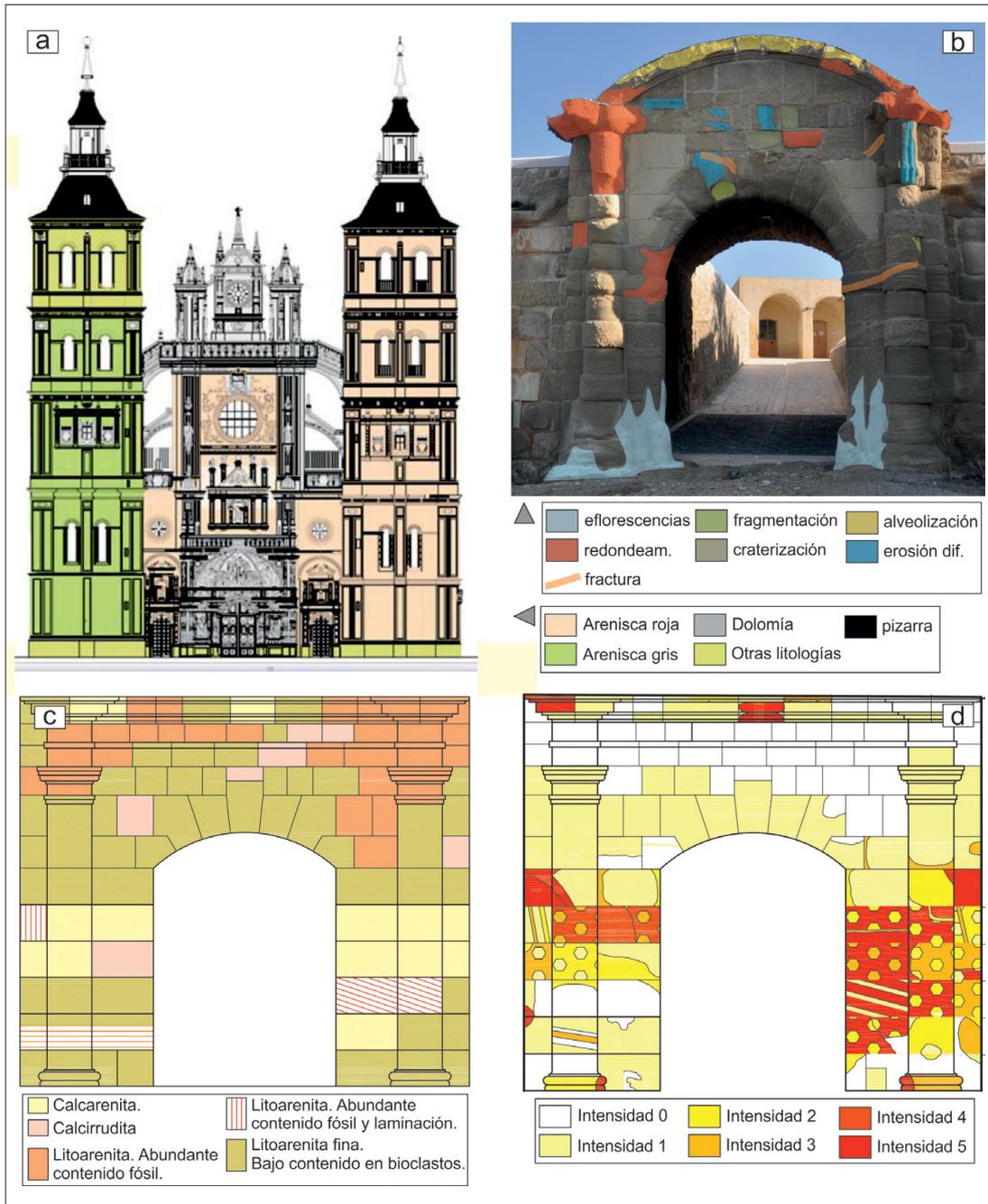


Fig. 4. Ejemplos de cartografías temáticas. (a) Cartografía litológica sobre alzado arquitectónico preciso, mostrando la distribución de principales tipos petrológicos (cartografía realizada y cedida por Dr. Enrique Álvarez Areces); (b) Cartografía de Formas de Alteración sobre fotografía; (c) Cartografía litológica sobre esquema constructivo, mostrando la distribución de diferentes subvariedades de dos tipos petrológicos principales; (d) Cartografía de intensidad de alteración sobre esquema constructivo.

cartografía indicando las diferentes actuaciones y su ubicación en el monumento. Dentro de esta cartografía se puede señalar (por ejemplo): piezas nuevas de reposición; volúmenes de reintegración con morteros; refuerzo de cornisas y salientes con perfiles metálicos; redes para evitar el acceso de aves; sistemas para evitar el posado de aves; perforación de muros con canales de aireación; etc.

TRABAJO POSTERIOR EN EL AULA

Análisis de los Procesos Dinámicos de Alteración: Interpretando 'lo que no se ve'

Tal y como se mencionó en la introducción de este artículo, el análisis geológico del patrimonio arquitectónico no sólo se limita al estudio descriptivo de las rocas y su estado de conservación, sino que

también se puede interpretar los procesos dinámicos de alteración que actúan sobre los materiales. Estos procesos son los mismos que se estudian en el modelado geomorfológico del paisaje: procesos de alteración por cristalización de sales, procesos de hiel-deshielo, choque térmico, abrasión eólica, etc. (se puede encontrar más información sobre las principales causas de deterioro de la piedra natural en Fort González, 2009).

La tabla I sintetiza los procesos más frecuentemente asociados a las diferentes formas de alteración desarrolladas en la roca, aunque esta relación no es exclusiva.

Para la interpretación de los procesos dinámicos de alteración conviene recordar que la manifestación resultante en la roca es el resultado de la adaptación de la roca al clima de exposición del monumento. La agresividad del ambiente de exposición

Tipo de Alteración	Definición	Posible proceso asociado
Colonización biológica 1	Capa de plantas y microorganismos sobre la superficie de la roca.	Su aparición se debe a la existencia de sustratos idóneos, iluminados (sin sol directo) y con abundante humedad.
Costra 2	Capa de material coherente en la superficie de la roca. El espesor puede ser homogéneo o irregular.	Puede tener múltiples orígenes. Habitualmente se forman por la acumulación masiva de sales (costra salina) o bien por la interacción de la roca con contaminantes atmosféricos (costras negras).
Enmugrecimiento 3	Fina capa de partículas sólidas atmosféricas (polvo, hollín, etc.) dando lugar a una apariencia de suciedad.	Habitualmente se desarrolla en ambientes urbanos por el depósito de partículas en suspensión. El desarrollo de esta capa puede dar lugar a una costra.
Eflorescencia 4	Acumulación cristalina, pulverulenta, poco cohesiva y blancuzca de sales.	Generadas por la cristalización de las sales disueltas en el agua existente en los poros de la roca al evaporarse.
Depósito 5	Acumulación puntual de material dando lugar a grumos o montones (por ejemplo: salpicaduras de mortero o acumulación de guano)	Puede tener múltiples orígenes, tanto antrópico como natural.
Graffiti 6	Pintadas de tinta o pintura sobre la piedra. Los graffitis también pueden estar grabados en la roca.	Suelen tener origen vandálico, aunque algunos tienen valor histórico.
Tinción 7	Cambio de color superficial, de extensión reducida.	Asociado a la oxidación de elementos metálicos próximos a la piedra.
Erosión diferencial 8	Ocurre cuando la erosión de la superficie de la roca no avanza con la misma velocidad en distintas áreas de la piedra, dando lugar a relieves y entrantes.	Debido normalmente a la presencia de componentes petrológicos de diferente dureza.
Disgregación 9	Disgregación de granos individuales o agregados de estos.	La pérdida de los granos se produce cuando pierden la cohesión con la roca tras la pérdida de la matriz o cemento que los unía, o bien cuando se produce una fuerte microfisuración que individualiza componentes.
Delaminación 10	Separación física de una o varias capas de la superficie de la roca a favor de una laminación preexistente en la misma. Cuando la delaminación se produce de forma independiente de la estructura de la roca se llama <i>Descamación</i> .	Normalmente se debe a la cristalización de sales, hielo o biocolonización entre las láminas.
Microdescamación 11	Caso particular de la <i>Descamación</i> , donde se individualizan pequeñas escamas de espesor mm o submm.	Normalmente se debe a la cristalización de sales entre las láminas.
Alveolización 12	Formación de cavidades en la superficie, separadas habitualmente por delgadas paredes.	Normalmente se debe a la cristalización de sales en rocas con texturas complejas y/o heterogeneidades en sus propiedades físicas y químicas.
Redondeamiento 13	Erosión preferente en las aristas de la piedra, generando un perfil redondeado.	Habitualmente, el redondeamiento está asociado a disgregación granular y está promovido por las mismas causas.
Fragmentación 14	Rotura total o parcial de la piedra en trozos irregulares, normalmente dando lugar a superficies limpias y frescas.	La fragmentación puede estar provocada por sobrecarga de las estructuras. Cuando la rotura se asocia a acciones mecánicas (impactos, abrasión, incisiones, etc) se clasifica como ' <i>daños de origen mecánico</i> '.
Fisura 15	Grieta individualizada, visible a simple vista pero de pequeña apertura (<0.1mm).	Tanto las fisuras como las fracturas se pueden generar por problemas de sobrecarga de la pieza, o bien por intemperismo (heladas), terremotos, fuego, o por incompatibilidad entre materiales (oxidación de elementos metálicos introducidos en la piedra). Las fracturas pueden desarrollarse a partir de defectos previos en la roca, o no.
Fractura 16	Grieta de mayor entidad que la fisura. Habitualmente atraviesa totalmente o en buena medida la sección de la pieza.	

Tabla I. Breve reseña de las formas de alteración recogidas en el diagrama de flujo de la figura 2, en la que se incluye una breve definición y una revisión de los posibles procesos que la causan.

dependerá, por lo tanto, de la propia agresividad de los factores ambientales (cantidad de precipitaciones, rango térmico, régimen de vientos, etc) y de la resistencia intrínseca que oponga la roca al deterioro. Por ello, diferentes rocas expuestas en un mismo ambiente no tienen por qué sufrir la misma intensidad de deterioro (ni manifestarlo a través de las mismas formas); y a su vez, una misma roca expuesta en ambientes diferentes podrá mostrar respuestas igualmente diferentes.

Por último, en este punto es importante transmitir al estudiante la rotunda diferencia entre la descripción objetiva de la realidad (tipos de rocas empleados, grado de alteración, formas de alteración que muestra, etc.) y la interpretación de los procesos que han generado el deterioro de los materiales. En el primer caso, si la descripción está hecha correctamente, no debería existir divergencias de opinión significativas entre diferentes observadores; mientras que en el segundo caso, la interpretación del proceso causante del deterioro depende de lo evidente que resulte la relación causa-efecto (presencia de abundantes eflorescencias salinas para asegurar un proceso de haloclastia; concentraciones de hielo en la superficie de la roca durante el invierno que justifiquen daño por procesos de hielodeshielo; etc.) y de la experiencia del observador en la interpretación de casos similares.

Reflexiones sobre la piedra en el patrimonio: Actividades complementarias.

Una vez elaboradas todas las cartografías, se puede completar el análisis del monumento mediante actividades complementarias y/o cuestiones globales que contribuyan a aumentar la visión integral de la relación entre la piedra, el patrimonio arquitectónico y las condiciones ambientales de exposición. Estas reflexiones se pueden incluir en el trabajo individual de cada alumno, sirviendo de eje para la discusión de sus resultados; o bien se puede tratar en común mediante un debate participativo en el aula en el que cada estudiante exponga brevemente sus resultados y se comparen los diferentes puntos de vista.

Si se emplean distintas litologías en el monumento, ¿existe un uso preferente de cada variedad para determinados usos constructivos (zócalos, ornamentos, esculturas, etc)? ¿por qué?

No todas las rocas se trabajan con la misma facilidad ni admiten el mismo grado de detalle en el acabado. Esto hace que, en ocasiones, determinadas variedades petrológicas se destinasen a determinados usos constructivos en función de la exigencia de la pieza final y de la facilidad de trabajo. Algunos aspectos petrológicos que controlan la "trabajabilidad" de un material son: la porosidad, el tamaño de poro, el tamaño de cristal, la resistencia mecánica o el grado de heterogeneidad petrográfica. Sin embargo, como regla general, la mayor facilidad de trabajo se corresponde con una menor durabilidad de la pieza a la acción de los agentes atmosféricos. ¿Se observa alguna coincidencia entre la cartografía litológica, la cartografía de intensidades y el grado de sencillez de la geometría de la pieza acabada?

Si se observan diferentes litologías y diferentes formas de alteración: ¿existe una correlación y dependencia entre unas y otras?

Es interesante que el alumnado concluya si existe alguna preferencia en la aparición de determinadas formas de alteración sobre alguna variedad litológica concreta. Cualquier asociación que se observe puede constituir una conclusión valiosa del trabajo, aunque explicar y justificar por qué determinadas variedades se deterioran siguiendo determinados patrones es bastante más complicado.

¿Existen zonas preferentemente alteradas en el monumento?

En ocasiones, analizar la distribución espacial de las zonas de máxima intensidad de alteración puede aportar información para comprender el origen del deterioro. Por ejemplo, si la zona de máxima alteración se ubica en la parte baja de la fachada (zona capilar), la causa puede estar asociada a la cristalización de sales tras la evaporación del agua capilar que ha ascendido desde el subsuelo. Si la zona de máxima alteración se ubica en zonas sin protección a la escorrentía (zonas de fachada sin alero, bordes de cornisa, etc.) entonces el problema puede estar asociado a las precipitaciones.

¿Cómo se podría eliminar (o mitigar) las causas de alteración de la piedra? O en caso de que ya se haya intervenido en el monumento ¿parecen efectivas las medidas tomadas?

Estas preguntas pueden ser complejas de responder, y no existe una respuesta cerrada, pero potencian el razonamiento crítico y la creatividad del alumno.

¿Todo el monumento estudiado es original?

Esta pregunta puede abrir un trabajo de investigación individual interesante. En ocasiones (y según la formación del alumnado), es posible identificar elementos incorporados al monumento en fechas posteriores a su construcción. En otras (quizá la mayoría), esta tarea es incierta e inabordable. Sin embargo, el alumnado puede recurrir a fotografías antiguas, documentación bibliográfica o indagar en la tradición oral, para conocer la historia constructiva del monumento. En el caso óptimo de conocer diferentes fases de construcción, aparecen nuevas preguntas: ¿se emplearon los mismos materiales? ¿Hay diferencias en la intensidad de alteración de las partes originales y las posteriores reconstrucciones? ¿Hay diferencia en las formas de alteración que se observan en las diferentes fases de construcción?

CONSIDERACIONES FINALES

Los muros del patrimonio arquitectónico construido en piedra encierran un gran potencial didáctico desde el punto de vista de las Ciencias de la Tierra. En este trabajo se presentan diversas actividades docentes para que el alumnado se aproxime, de forma atractiva, interesante y autónoma, al estudio geológico de los monumentos, combinando el trabajo en el aula y sesiones de observación directa

en el monumento. El grado de exigencia y complejidad de cada actividad se puede regular redefiniendo tanto sus objetivos concretos como seleccionando correctamente el caso de estudio. De esta forma, estos ejercicios prácticos resultan aptos para un amplio rango de niveles de formación, desde cursos pre-universitarios hasta Grados Universitarios relacionados con materiales de construcción y/o restauración (Geología, Bellas Artes, Arquitectura, Ingeniería de la Edificación, etc.).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Dr. Enrique Álvarez Areces la cartografía litológica de la catedral de Astorga cedida para su publicación en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Gomez-Heras, M. y McCabe, S. (2015). Weathering of stone-built heritage: a lens through which to read the Anthropocene. *Anthropocene*, 11: 1-13.

ICOMOS (2011). *Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns / Glosario ilustrado de formas de deterioro de la piedra*. ICOMOS ISCS, Vergès-Belmin, 82 pp.

Fort González, R. (2009). La piedra natural y su presencia en el patrimonio histórico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(1): 16-25.

Franco, M.P. y Gonzalo, J.C. (2000). Taller de petrología: Enseñanza de la Petrología con el microscopio petrográfico. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 8(1): 38-47.

Morgan, N. (2016): Gravestone geology. *Geology today* 32(4): 154-159.

Pérez-Monserrat, E.M., Álvarez de Buergo, M., Gómez-Heras, M., Varas Muriel, M.J., Fort González, R. (2013): An urban geomonumental route focusing on the petrological and decay features of traditional building stones used in Madrid, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 69(4): 1071-1084.

Rodrigo Sanz, A., Lozano Fernández, R.P. y Baeza Chico, E. (2008). Talleres didácticos en el Museo Geominero (IGME, Madrid): identificación de fósiles, minerales y rocas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 16(1): 92-98.

Vázquez Calvo, M.C., Pérez-Monserrat, E.M., Varas Muriel, M.J., Álvarez de Buergo, M., Fort González, R. (2008): La geología en la conservación del patrimonio arquitectónico: otra forma de difundir el patrimonio geológico. *Geotemas*, 10: 1339-1342. ■

Este artículo fue recibido el día 29 de octubre de 2018 y aceptado definitivamente para su publicación el 12 de enero de 2019.