

# La arqueosismología: un nuevo registro sísmico, una herramienta docente y de protección del Patrimonio

## *Archaeoseismology: a new seismic record, a teaching tool for Heritage Protection*

**MIGUEL A. RODRÍGUEZ-PASCUA<sup>1</sup>, FRANCISCO J. MORALES MANZANOS<sup>2</sup>, JORGE L. GINER-ROBLES<sup>3</sup>, INMACULADA PALOMO LOZANO<sup>2</sup>, FIDEL MARTÍN-GONZÁLEZ<sup>4</sup>, PABLO G. SILVA BARROSO<sup>5</sup> Y RAÚL PÉREZ-LÓPEZ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid. España. E-mail: ma.rodriguez@igme.es, r.perez@igme.es

<sup>2</sup> Escuelas Francesas, S.A.L. C/Almendralejo, 18. 41019-Sevilla. España. E-mail: javier.morales@andaluciajunta.es, inmapalomo@escuelasfrancesas.es

<sup>3</sup> Dpto. Geología. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Cantoblanco. Tres Cantos. Madrid. España. E-mail: jorge.giner@uam.es

<sup>4</sup> Área de Geología y Geoquímica. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. C/Tulipán, s/n. Móstoles, 28933 Madrid. España. E-mail: fidel.martin@urjc.es

<sup>5</sup> Dpto. Geología. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad Salamanca. 05003-Ávila. España. E-mail: pgsilva@usal.es

**Resumen** La Arqueosismología es una técnica multidisciplinar enfocada al estudio de terremotos en el pasado histórico mediante yacimientos arqueológicos y patrimonio cultural. La inclusión del análisis estructural geológico en el estudio de las deformaciones sísmicas del patrimonio cultural, permiten conocer cuál ha sido el origen de las mismas y cómo se comportará este patrimonio en el futuro. También puede aportar nuevos datos a los catálogos sísmicos, con terremotos no registrados documentalmente. La modelización de Efectos Arqueológicos de Terremotos (EAEs) es aplicable a la docencia utilizando modelos simples a escala en el laboratorio. La arqueosismología se muestra como una herramienta adecuada para aplicar en la prevención contra terremotos que pueden afectar a nuestro patrimonio cultural.

**Palabras clave:** Terremoto, Arqueosismología, Efectos Arqueológicos de Terremotos (EAEs), Análisis Estructural Geológico, modelización de procesos.

**Abstract** *Archaeoseismology is a multidisciplinary technique used to study historical earthquakes by means of archaeological sites and cultural heritage. The inclusion of structural geological analysis in the study of seismic deformations of cultural heritage can reveal the origin of such deformations and provide an indication of how the heritage will behave in the future. Archaeoseismology can also add new data to seismic catalogues through unregistered earthquakes. The modelling of Earthquake Archaeological Effects (EAEs) is applicable to teaching, using simple scale models in the laboratory. Archaeoseismology is an appropriate tool for use in earthquake prevention affecting cultural heritage.*

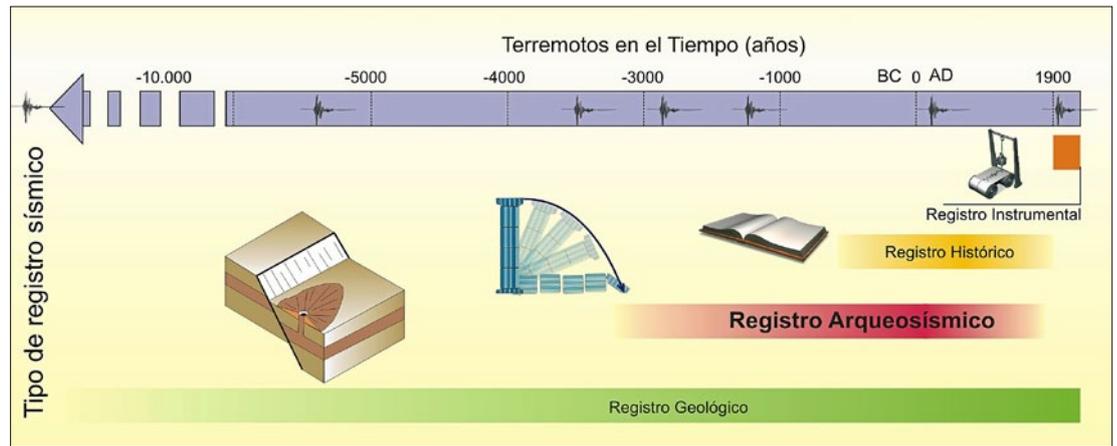
**Keywords:** *Earthquake, Archaeoseismology, Earthquake Archaeological Effects (EAEs), Geological Structural Analysis, process modelling.*

## INTRODUCCIÓN

Podríamos definir la Arqueosismología como la disciplina encargada del estudio de los terremotos a través del estudio de sus efectos extraídos de yacimientos arqueológicos y/o patrimonio cultural. A pesar de que la arqueosismología empezó a crearse a finales del s. XIX, en los últimos años, ya ha pasa-

do de ser un modismo a una disciplina conocida y aplicada en el ámbito del estudio de los terremotos. Lyell en su “Principios de Geología” de 1872, ya cita varios casos de excavaciones arqueológicas utilizadas para determinar la presencia de terremotos en el pasado. Los diferentes esfuerzos realizados por múltiples autores desde los años 80’ (Rapp, 1982; Zang et al., 1986; Stiros, 1988a y b; Nikonov, 1988;

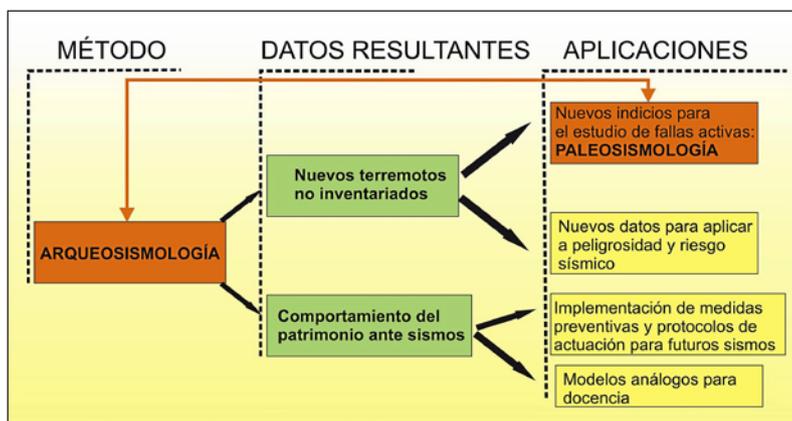
Fig. 1. Intervalo temporal ocupado por el registro arqueosismológico.



Guidoboni, 1989) han hecho que esta técnica multidisciplinar sea conocida en el ámbito de la sismología y comience a ser tenida en cuenta, aunque otros autores ya habían introducido con anterioridad los terremotos en las interpretaciones arqueológicas (Lanciani, 1918). Cuando en los años 90 se realiza una recopilación del estado del conocimiento llevada a cabo por Stiros y Jones (1996), coinciden tanto en la necesidad de la colaboración multidisciplinar entre arqueología, sismología, geología, ingeniería, arquitectura e historia, así como, en preguntarse ¿Qué criterios son necesarios para identificar efectos sísmicos en un yacimiento arqueológico? La primera premisa está ampliamente aceptada y el trabajo multidisciplinar es absolutamente necesario para poder avanzar en el estado del conocimiento en Arqueosismología. El rango temporal que abarca la arqueosismología depende de la zona en la que nos encontremos. Sobre todo es útil desde la aparición de las primeras construcciones humanas susceptibles de ser afectadas por terremotos, aunque también se han registrado en ocasiones colapsos en cuevas atrapando *Homo sapiens* o neandertales, por lo que el registro podría irse hasta el Pleistoceno. En el caso de España el registro puede ir hasta la Edad del Bronce, pero para ser utilizado con ciertas garantías no podríamos ir más allá de la romanización (s. III BC) (Fig. 1).

En cuanto a los criterios a tener en cuenta para discriminar el origen sísmico de las deformaciones encontradas en un yacimiento arqueológico, aún son objeto de debate científico. En este sentido han surgido trabajos como el de Sintubin y Stewart (2008) en el que proponen una metodología con

Fig. 2. Aplicaciones y tipos de datos que generan los estudios arqueosismológicos.



estructura de árbol lógico para cuantificar un factor del potencial arqueosísmico de un yacimiento arqueológico. Pero para poder discriminar el origen sísmico de estructuras de deformación en yacimientos arqueológicos es necesario aplicar una metodología científica; para lo cual, lo primero que se necesita es una clasificación de estructuras en función de su origen. Rodríguez-Pascua et al. (2011) proponen una clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects, EAEs) que cubre este paso inicial. Una vez clasificados estos efectos se lleva a cabo un análisis estructural geológico para poder determinar si son estructuras que siguen patrones de deformación orientados por el movimiento del terreno o no. En este sentido, Giner Robles et al. (2011) editan una guía metodológica de trabajo en este ámbito.

Desde 2009 se han celebrado tres congresos internacionales en Arqueosismología, asociados al IGCP 567 (*Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone*) de la UNESCO. El primero fue celebrado en Baelo Claudia (Cádiz), el segundo en Corinto (Grecia) y el tercero en Morelia (México). Uno de los objetivos principales de este IGCP es el establecimiento de una metodología reglada en arqueosismología y el intercambio de conocimientos entre las distintas disciplinas que forman los equipos de trabajo en arqueología. La reunión de Morelia (México), celebrada en 2012, tuvo como objetivo difundir estas metodologías en el continente americano, tan rico en yacimientos arqueológicos y fuertes terremotos.

## METODOLOGÍA

La Arqueosismología es una disciplina multidisciplinar que tiene un doble objetivo: por un lado, el determinar terremotos no registrados históricamente, y por otro, el estudio del comportamiento sísmico del patrimonio cultural. Con todos estos datos, se abren nuevas posibilidades para el estudio de fallas activas mediante paleosismología, se obtienen nuevos registros para completar los catálogos sísmicos, para su aplicación a la peligrosidad y riesgo sísmico, y para la creación de protocolos de actuación para protección del patrimonio en caso de sismo, así como la toma de medidas preventivas (Fig. 2). En el caso de la paleosismología el flujo

metodológico es reversible, puesto que investigaciones paleosismológicas en fallas activas también nos pueden poner sobre la pista de yacimientos arqueológicos que pudieron ser afectados por estos paleoterremotos.

Para poder identificar terremotos en el pasado histórico se puede recurrir a tres tipos de registro:

- Documental
- Arqueológico
- Edificaciones y construcciones de interés patrimonial

Con toda esta información, y el trabajo de campo, podremos catalogar los diferentes EAEs. Los EAEs se muestran como buenos indicadores para la identificación de terremotos no registrados históricamente, permitiendo la cuantificación de la deformación y su aplicación a la protección del patrimonio cultural. Estas metodologías han sido calibradas con éxito en el reciente terremoto de Lorca (11/05/2011) (Giner Robles et al., 2012; Rodríguez-Pascua et al., 2012a) y han sido utilizadas tanto en la estabilización de edificios históricos como en los planes de restauración (De la Hoz, 2012a y b).

Con toda la información previa recopilada se pasaría al estudio en detalle de las deformaciones que representan los EAEs, mediante análisis estructural geológico y/o modelización numérica mediante computación. El objetivo principal es calcular las orientaciones de las deformaciones de las construcciones y su relación, tanto con la falla que generó el terremoto, como con la llegada de las ondas sísmicas al yacimiento. Todos estos datos arqueosísmicos pueden ser corroborados y validados por técnicas paleosismológicas, las cuales van a permitir calcular los parámetros sismogénicos de la falla que produjo el sismo, entre ellos la secuencia sísmica de los últimos terremotos que afectaron al yacimiento arqueológico.

El caso del terremoto de Lorca de 2011 también puso de manifiesto la necesidad de crear protocolos de intervención rápida, tanto desde un punto de vista de la protección del patrimonio, como de la toma de datos de EAEs, que permitan respaldar las intervenciones en la protección patrimonial (conclusiones de las Jornadas de expertos sobre Patrimonio en Riesgo que organizó el IPCE en Lorca; IPCE, 2012). Todo esto indica el potencial de una disciplina que está emergiendo en la actualidad y que está respaldada por instituciones como INQUA (*International Association for Quaternary Research*) o la UNESCO mediante sus proyectos IGCP.

La facilidad de elaboración de modelos análogos de muchas de las estructuras de deformación sísmica en edificios históricos, hace de la Arqueosismología una herramienta muy útil en docencia, para que el alumno comprenda mejor los fenómenos físicos que tienen lugar durante un terremoto.

### Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects, EAEs)

En toda investigación arqueosismológica es necesario realizar una clasificación de EAEs previa a su estudio pormenorizado. Para este fin, Rodríguez-Pascua et al. (2011) proponen una clasificación de EAEs, basada en los efectos que se producen durante el te-

rremoto y los que tienen lugar después del mismo; es decir, efectos cosísmicos y postsísmicos. Los efectos cosísmicos se pueden dividir a su vez en efectos geológicos y efectos en la fábrica de los edificios (Fig. 3). Dentro de los Efectos Arqueológicos de Terremotos (EAEs), los efectos postsísmicos o efectos indirectos, pueden dar pistas para iniciar una investigación arqueosísmica en un determinado yacimiento, pero no van a permitir determinar de forma directa la existencia de un terremoto en el pasado.

Las descripciones históricas de terremotos también aportan datos de edificaciones importantes que sufrieron daños, como puedan ser catedrales o palacios. Esta información permite focalizar

Fig. 3. Tabla de clasificación de Efectos Arqueológicos de Terremotos (Earthquake Archaeological Effects, EAEs) (modificada de Rodríguez-Pascua et al., 2011).

<b>EFFECTOS ARQUEOLÓGICOS DE TERREMOTOS (EAE)</b>	<b>I. EFECTOS COSÍSMICOS PRIMARIOS (EFECTOS DIRECTOS)</b>	<i>Efectos geológicos asociados a la falla</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Escarpes de falla</li> <li>- Levantamientos / hundimientos</li> </ul>	
		<i>Efectos geológicos alejados del plano de falla</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Licuefacciones y diques de arena</li> <li>- Deslizamientos</li> <li>- Caída de bloques</li> <li>- Tsunamis/Seiches</li> <li>- Colapsos en cavidades</li> <li>- Pavimentos de argamasa plegados</li> <li>- Fracturas y pliegues en enlosados regulares</li> <li>- Fracturas y pliegues en enlosados irregulares</li> <li>- Compactación de sustratos y rellenos antrópicos</li> </ul>	
	<b>EFECTOS EN LA FÁBRICA DE LOS EDIFICIOS</b>	<i>Estructuras de deformación generadas por deformación permanente del sustrato</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impactos entre el enlosado</li> <li>- Contrafuertes desplazados y girados</li> <li>- Muros basculados</li> <li>- Muros desplazados</li> <li>- Muros Plegados</li> </ul>	
		<i>Estructuras de deformación generadas por deformación transitoria del sustrato</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fracturas penetrativas en bloques de sillería</li> <li>- Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo</li> <li>- Columnas caídas y orientadas</li> <li>- Giros en bloques de sillería y columnas</li> <li>- Bloques de sillares desplazados</li> <li>- Claves de arco desplazadas</li> <li>- Escalones y líneas de bordillo plegadas</li> <li>- Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros)</li> <li>- Bóvedas colapsadas</li> <li>- Marcas de Impacto</li> <li>- Cerámica aplastada</li> <li>- Esquinas fracturadas</li> </ul>	
<b>II. EFECTOS 2º POSTSÍSMICOS (EFECTOS INDIRECTOS)</b>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incendios</li> <li>- Reparación de construcciones</li> <li>- Elementos de reciclado anómalos</li> <li>- Abandonos injustificados</li> <li>- Falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica</li> <li>- Avenida súbita por roturas de presas artificiales o embalsamientos naturales</li> <li>- Construcciones antisísmicas</li> </ul>	



Fig. 4. Restos sumergidos del puerto oeste de Corinto (Grecia) 480-146 BC, hundido de forma violenta tras un terremoto.

Fig. 5. Pliegues (anticlinales y sinclinales) en el enlosado irregular del Decumanus Maximus de Baelo Claudia (Cádiz), deformado por el terremoto que destruyó la ciudad en 350-395 AD. Los pliegues representados en amarillo son perpendiculares a la pendiente topográfica y asociados a dicho terremoto. Los de color naranja son paralelos a la pendiente y están asociados a fenómenos de ladera.



la búsqueda de deformaciones arqueosísmicas en el campo. Mucha de esta información ya está recopilada y seleccionada por parte de catálogos como el de Galbis (1932 y 1940) o el de Martínez Solares y Mezcuca (2002). Sin embargo, existe más información referente a la especificación de daños en grandes construcciones, por ejemplo catedrales, cuyo contenido no ha sido objeto por parte de estos catálogos, centrados fundamentalmente en la identificación de eventos sísmicos, sin entrar en estos detalles. En algunos archivos catedralicios se puede encontrar información exhaustiva de estos efectos, como por ejemplo los daños producidos por el Terremoto de Lisboa (1755) en la Catedral de Coria (Martínez-Vázquez, 1999) o los efectos producidos en la Colegiata de San Patricio en Lorca por el terremoto de 1674 (Muñoz Clares et al., 2012). De este modo se puede tener un dato orientado de la deformación; dato que se puede contrastar observando los daños que han podido permanecer hasta nuestros días o las reparaciones de los mismos. En algunos casos también es posible encontrar información periodística con grabados de época en los que se puede extraer este tipo de deformaciones. Mención aparte merecen los terremotos acaecidos después de la invención de

la fotografía, donde podemos observar de forma directa estos EAEs.

Los efectos geológicos se subdividen en efectos asociados al plano de falla que generó el terremoto, o alejados de éste (Fig. 3). El efecto extremo sería la rotura de un yacimiento por el salto de falla generado durante el terremoto. Otros efectos geológicos asociados al plano de falla serían los hundimientos o elevaciones cosísmicas. Para poder identificar estos movimientos en el pasado arqueológico es necesario contar con niveles de referencia, como es el nivel del mar o el de masas lacustres. Así existen numerosos ejemplos de estos efectos: uno de ellos se puede contemplar en los restos del antiguo puerto oeste de Corinto en el Golfo de Salónica (Grecia), cuya edad está entre el 480 al 146 BC (Fig. 4). Estas instalaciones portuarias quedaron sumergidas por el giro del bloque superior de una falla normal durante un terremoto, haciendo que esta zona quedase sumergida de forma casi instantánea durante el terremoto.

Los efectos geológicos alejados del plano de falla pueden estar asociados a fenómenos como la licuefacción, caída de bloques de roca, tsunamis, colapsos en cuevas o deformaciones en los pavimentos (Fig. 3). Su origen es claramente geológico y el responsable de la deformación en el yacimiento es directamente dicho fenómeno. Uno de los ejemplos más espectaculares, a la vez que dañinos y efímeros en cuanto a su conservación, son las licuefacciones. Éstas consisten en que el sustrato formado por sedimentos no consolidados empapados en agua se comportan durante un breve espacio de tiempo como un fluido. Este comportamiento puede generar tanto subsidencias, como daños directos en la cimentación de las edificaciones. El fenómeno de la licuefacción ha sido ampliamente documentado en la literatura histórica referente a grandes terremotos como en el terremoto de Calabria de 1786 (Lyell, 1872). En la serie sísmica de la Emilia Romagna (Italia) en mayo de 2012 también se pudieron registrar este tipo de fenómenos afectando a localidades enteras como San Carlo, con importantísimos daños (Rodríguez-Pascua et al. 2012b).

Los efectos en la fábrica de los edificios (Fig. 3) se subdividen en los que están asociados a deformaciones permanentes del sustrato y/o cimentaciones de las construcciones y los que están generados por la deformación transitoria del sustrato al paso de las ondas sísmicas. Por tanto, en el caso de los primeros podremos observar tanto las deformaciones del sustrato como las de la edificación; mientras que en los segundos sólo observaremos los daños producidos en la fábrica del edificio.

Un buen ejemplo de las deformaciones permanentes del sustrato son los choques de baldosas que generan su rotura parcial, indicando la orientación de la dirección de impacto. Un buen conjunto de estos efectos se pueden observar en el yacimiento arqueológico de la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz); así como pliegues en los enlosados, tanto regulares como irregulares (Fig. 5). Esta ciudad fue afectada por dos terremotos en 40-60 AD y 350-395 AD, siendo abandonada en el último terremoto, lo que ha hecho que permanezca prácticamente sin ocupaciones posteriores hasta



Fig. 6. Caída orientada de la columnata del muro sur (de orientación E-O) del cementerio de Mirandola (Italia). La caída es hacia los N354°E, producida por el terremoto de la Emilia Romagna del 29 de mayo de 2012.

nuestros días (Silva et al., 2005 y 2009). Esto hace de Baelo Claudia un verdadero laboratorio natural para el estudio de la Arqueosismología y una potencial clase práctica para los alumnos.

Los EAEs asociados a la deformación transitoria del sustrato afectan a toda la fábrica del edificio o elemento constructivo, por lo que hay un amplio catálogo de estructuras (Fig. 3). Se describirán aquí las más interesantes desde un punto de vista de su análisis y de la información que pueden aportar. Un EAE muy interesante son las caídas orientadas de columnas, ya que estas nos van a marcar tanto la dirección como el sentido del pulso sísmico predominante. Existen muchos ejemplos en la antigüedad como el Templo de Zeus en Olimpia, la ciudad nabatea de Petra o las columnatas de Susita en Israel. En la serie sísmica de la Emilia Romagna de mayo de 2012, concretamente en el terremoto del 29 de mayo (Mw= 5.8) se pudo documentar en la caída orientada hacia los N354°E de la columnata de uno de los laterales E-O del cementerio de Mirandola, siendo coherente con el resto de EAEs medidos en el propio cementerio y en la región (Fig. 6). Esto viene a validar las hipótesis de partida planteadas para este EAE desde los inicios de la arqueosismología para la caída orientada de columnas.

Otro elemento EAE clásico es la caída de las claves de los arcos. Éste se produce porque los esfuerzos que sustentan los arcos, que recaen en las paredes laterales, quedan anulados al moverse de forma alternante en la misma dirección que el arco, descargando los esfuerzos de las dovelas del arco; haciendo que las claves caigan por el peso que sustentan dichos arcos. Se pueden generar tanto en bloques de sillería como en arcadas de ladrillo. Buenos ejemplos los podemos encontrar en los terremotos de Lorca de 2011 (Fig. 7A) y de la Emilia Romagna de 2012 (Fig. 7B).

Los pliegues y deformaciones en escalones y bordillos marcan muy bien las direcciones de compresión y en algunos casos incluso reflejan las ondulaciones a las que fueron sometidos durante el paso de las ondas sísmicas. Estas oscilaciones



Fig. 7. Caída de claves de arco: A) en arcos de sillería de la Colegiata de San Patricio de Lorca (terremoto del 11 de mayo de 2011); B) en arcos de ladrillo en una casa de la Emilia Romagna (Italia) (terremoto del 20 de mayo de 2012).

pueden generar la extrusión hacia fuera de los escalones, fenómeno que no se puede dar por otras causas, por lo que es utilizado como un buen marcador sísmico. La escalinata de la Pirámide de Quetzalcóatl en la Ciudadela de Teotihuacan (México), es un buen ejemplo de este fenómeno, en el que se refleja tanto el paso de la onda, como la extrusión de bordillos y el golpeo de esquinas entre los bloques de basalto que forman la escalinata (Fig. 8).

#### Análisis estructural geológico de EAEs

Las deformaciones producidas en un conjunto urbano van a estar condicionadas por el mecanismo disparador que las generó. El colapso de un muro puede ser generado tanto por un terremoto como por una explosión, por ejemplo, pero, ¿cómo podríamos diferenciarlas? Las deformaciones producidas por un terremoto van a estar condicionadas por la orientación del pulso sísmico predominante, mientras que una explosión generaría el colapso indiscriminado y radial de las estructuras que lo rodeasen. De este modo, si medimos las orientaciones de las deformaciones de la arruinada ciudad de Belchite (Zaragoza), destruida por fuertes combates durante la Guerra Civil Española (septiembre de 1937), no podría-

Fig. 8. Escalinata de la pirámide de Quetzalcóatl en la Ciudadela de Teotihuacán (México), deformada por efecto de un terremoto. Nótese la extrusión de peldaños y los pliegues horizontales de las hiladas de bloques en cada escalón.





Fig. 9. Vector de desplazamiento de la esquina NO de la Torre del Espolón en el Castillo de Lorca, como consecuencia del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011.

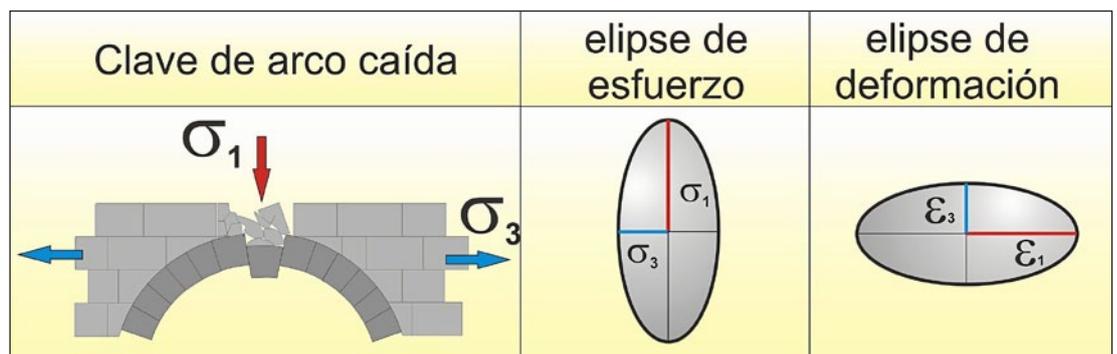
mos encontrar ningún patrón de deformación que se ajustase a una orientación en concreto, sino que las deformaciones producidas no estarían orientadas. Sin embargo, la llegada del pulso sísmico predominante sí que produce un primer impulso en una determinada orientación, la cual va a condicionar la disposición de las deformaciones. Nosotros proponemos un problema inverso, en el que mediante las deformaciones observadas se puedan calcular las orientaciones del elipsoide de deformación producido por el terremoto en la construcción antigua. La orientación de los ejes de deformación de las diferentes estructuras estudiadas debería ser similar si hubiesen estado generadas por un único efecto, en este caso la llegada del pulso sísmico predominante. En caso contrario, encontraremos una fuerte dispersión en los ejes de los diferentes elipsoides calculados, como sería el caso de estudiar las distintas explosiones generadas por impactos de artillería en una ciudad devastada.

Las técnicas clásicas de análisis estructural geológico son herramientas adecuadas para el cálculo de los elipsoides de deformación de origen sísmico que se extraen de las deformaciones halladas en yacimientos arqueológicos. El yacimiento arqueológico de la antigua ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz) fue el primer yacimiento arqueológico en España estudiado desde un punto de vista arqueosismológico (Silva et al., 2005; 2009). La riqueza y variedad de estructuras de

deformación en este yacimiento ha hecho que se haya utilizado como laboratorio para la aplicación de técnicas de análisis estructural geológico (Giner Robles et al., 2009 y 2011). Otro yacimiento estudiado y del que se ha determinado un fuerte terremoto en época alto imperial romana es el Tolmo de Minateda (Albacete) (Rodríguez-Pascua et al., 2009 y 2010)

Una vez clasificados los EAEs, siguiendo la clasificación propuesta, se pasa al análisis estructural geológico de las deformaciones. Un tensor define la variación en el espacio de la magnitud de los vectores de una determinada propiedad, por lo que con estos análisis conseguiremos calcular los tensores de deformación que sintetizan las características de las deformaciones en construcciones patrimoniales. Un ejemplo de obtención directa de un vector orientado es cuando tenemos un punto que podemos identificar en el estado no deformado y en el deformado, como un bloque de sillería desplazado, en el que podríamos identificar un punto en un bloque inferior y su homólogo en el superior, pudiendo trazar un vector que los una. Este vector va a tener una orientación, que es una dirección en el espacio, con un sentido de movimiento y una magnitud, que corresponde al desplazamiento medido (Fig. 9). Este es uno de los casos más evidentes; en otras situaciones tendremos que recurrir al análisis de la fracturación, en los cuales se pueden desarrollar fracturas conjugadas (en aspa). Las fracturas en aspa generadas en muros de ladrillo se ajustan a estos modelos y el análisis de los mismos nos llevará al cálculo de dicho tensor. En el caso de contar con varias orientaciones en el espacio en un mismo edificio, se puede llegar a calcular el elipsoide de deformación, que será compatible con los tensores calculados de forma local (Fig. 10). Si proyectamos sobre la horizontal los ejes principales de la deformación podremos calcular las trayectorias de deformación que afectaron a un edificio en concreto o a una ciudad o conjunto de ciudades. Esto hace que podamos comparar estas trayectorias con las principales fallas activas de la zona y ayudarán a corroborar o descartar los posibles efectos sísmicos sobre las edificaciones. El caso del terremoto de Lorca de 2011 es un excelente ejemplo de aplicación de estas metodologías, pudiendo calcularse estas trayectorias para edificaciones tan importantes como la Colegiata de San Patricio, ya afectada por terremotos anteriores (Giner Robles et al., 2012; Rodríguez-Pascua et al., 2012a).

Fig. 10. Concepto de esfuerzo/deformación asociado a la caída de la clave de un arco como consecuencia de un terremoto y la representación de las elipses de esfuerzo y deformación responsables de dicho efecto.



## APLICACIONES PRÁCTICAS EN EL AULA. LA MODELIZACIÓN DE EAES: EL LABORATORIO DE ARQUEOSISMOLOGÍA COMO HERRAMIENTA DOCENTE

Por su naturaleza, la Arqueosismología se configura como un objeto didáctico ideal para su tratamiento multidisciplinar en el aula en relación con el currículo de materias tales como Biología-Geología, Geografía e Historia, Historia del Arte, Física, Matemáticas, Tecnología e incluso lenguas clásicas a través de aspectos culturales del Mundo Antiguo.

A continuación mostramos algunas de las experiencias prácticas que pueden realizarse de manera simple en el laboratorio de Geología (<http://www.youtube.com/user/geomathblog/>). Estas actividades permiten no solo la reproducción de fenómenos sísmicos y el estudio de sus efectos geológicos, sino también de las consecuencias que producen en la fábrica de los edificios y la investigación y validación de muchos de los efectos cosísmicos presentados en apartados precedentes de este artículo, así como de un mejor acercamiento al conocimiento del comportamiento de estructuras arquitectónicas ante los terremotos. Podemos también experimentar con los patrones de deformación orientados según el movimiento del terreno y reconstruir el comportamiento sísmico del patrimonio cultural con unas técnicas que no precisan en absoluto de grandes infraestructuras.

Para ello necesitaremos una mesa sísmica (Fig. 11) que puede construirse fácilmente, estructuras de madera para recrear elementos arquitectónicos, cubetas de plástico, arena fina, cilindros de madera que hagan las veces de columnas y teselas de las empleadas en decoración (gresite) para recrear enlосados. Podemos medir la frecuencia de las vibraciones a que sometemos las estructuras en la mesa sísmica si colocamos solidariamente sobre la misma un smartphone, o dispositivo similar, en el que hemos instalado alguna de las varias aplicaciones gratuitas de acelerómetros disponibles en la web, y que permiten registrar la frecuencia de vibración en los tres ejes del espacio.

El procedimiento de trabajo requiere de una documentación previa por parte del alumnado y una investigación sobre sucesos reales; las noticias y documentación científica disponible sobre el sismo de Lorca en Internet es un buen punto de partida (Martínez Díaz et al., 2011; Rodríguez Pascua et al., 2012a; Giner Robles et al., 2012; estos dos últimos trabajos están contenidos en la monografía 123-4 del Boletín Geológico y Minero de 2012 sobre el terremoto de Lorca de 2011, de acceso gratuito en: <http://www.igme.es/boletin/>). Sobre Arqueosismología y el método de trabajo se puede descargar de forma gratuita la monografía de Giner Robles et al. (2011) en: <http://www.mapfre.com/fundacion/es/becasypremios/pmma/ayudas-2009-proyecto-edasi.shtml>. La página de AEQUA (Asociación Española para el Estudio del Cuaternario; <http://www.aequa.es>) también contiene abundante información sobre Arqueosismología. Un recurso con amplias posibilidades es el cine de “catástrofes”. Sobre cine y riesgos geológicos podemos encontrar abundantes

e interesantes ideas para su tratamiento en el aula en Brusi et al. (2011). Una vez realizada la documentación, podemos modelizar procesos para después comparar los resultados obtenidos con la realidad a través de imágenes.

### Modelización de efectos en la fábrica de edificios

#### Pliegues en los enlосados

Sobre una cubeta de plástico colocamos teselas de las empleadas en decoración (gresite). Las usamos en esta experiencia son de piedra de 5 cm de lado. Las colocamos sobre un lecho de arena (la arena de grano fino presenta un mejor comportamiento) con un grado muy alto de humedad o directamente saturado en agua. Este aspecto facilita el desplazamiento de las teselas, al mismo tiempo que reproduce un factor que posiblemente influyó en las deformaciones de las estructuras en Baelo Claudia generadas por el terremoto que la afectó en el s. IV A.D., donde las arcillas infrayacentes y la saturación del sedimento superior pudo favorecer procesos de deslizamiento. Si sometemos el conjunto a movimientos de vaivén podemos observar cómo algunas de las teselas se montan sobre otras, en un comportamiento semejante al observado en la rea-

*Fig. 11. A) La mesa sísmica consiste en una plataforma de madera sujeta con muelles a unos soportes laterales que permiten el movimiento de la misma según los tres ejes del espacio. Las estructuras que van a someterse a vibración, pueden sujetarse sobre la plataforma con cinta adhesiva de doble cara o mediante tirafondos. A la derecha se ve la plataforma de cizalla. B) Alumnos utilizando la mesa sísmica junto a la cual se aprecian estructuras de madera para estudiar la resistencia sísmica en edificios. Todos los materiales pueden adquirirse en tiendas de bricolaje.*





Fig. 12. Pliegues en los enlosados en: A) enlosado del teatro de la ciudad romana de Baelo Claudia (Cádiz, España); B) enlosado de la acera de la calle Dolores en su confluencia con Independencia en México DF, estos pliegues fueron generados por el devastador terremoto de Michoacán de 1985; C) pavimento regular del Foro de Baelo Claudia y D) reproducción en laboratorio del comportamiento del pavimento con losas de decoración (gresite) sobre un lecho de arena saturada en agua.

lidad (Fig. 12). La experiencia puede repetirse con teselas irregulares sobre arena saturada en agua, observándose la producción de domos, aunque en este caso son precisos varios intentos para conseguirlo, pues la irregularidad del pavimento favorece la extrusión de la arena en lugar de la formación de domos. Cabe destacar que en la realización de estas experiencias son precisos varios ensayos antes de lograr el éxito.

#### Muros desplazados e inclinados

Las inclinaciones de muros suelen estar causadas por movimientos horizontales de los cimientos asociados, en este caso, a movimientos sísmicos. Se reproduce una estructura lineal -con ladrillos de escayola de 2 cm de largo- y se somete a un movimiento de cizalla en un dispositivo de mesa sísmica -formado por dos planchas de madera montadas sobre rieles de los usados para cajones, que permiten el movimiento paralelo de las mismas-, observándose una respuesta similar a la realidad. La dirección de la onda sísmica es perpendicular a la dirección principal de la estructura. En el caso del acueducto de Baelo Claudia, posiblemente influyeran deslizamientos cosísmicos del terreno en su deformación.

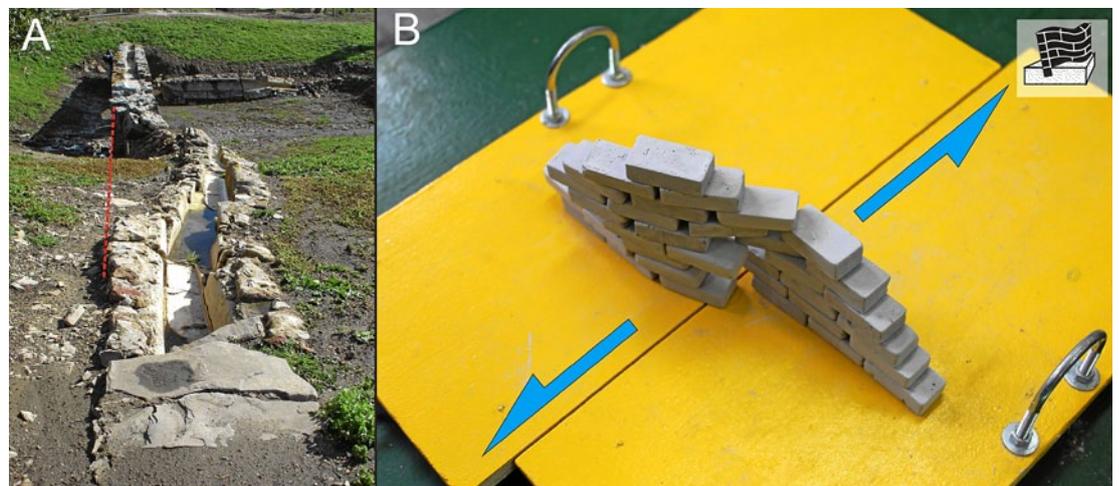


Fig. 13. A) Acueducto situado al Este de la ciudad romana de Baelo Claudia (vista desde el Oeste). La línea roja representa la disposición original del acueducto. El derrumbe observado se produce por movimientos de cizalla, aunque posiblemente influyeran deslizamientos del terreno en su deformación. B) reproducción en laboratorio (mesa sísmica); las flechas azules representan el movimiento relativo de las placas.

Si sobre la misma plancha construimos un muro más alto y lo sometemos de nuevo a movimientos de cizalla, se aprecia la formación de muros plegados (Fig. 13).

#### Caída orientada de columnas

La caída de columnas es una de las modelizaciones que mejor reproducen lo observado en el campo. Para realizarlo necesitamos modelos que pueden construirse con materiales diversos (madera, escayola...). Nosotros proponemos cilindros de madera de 15 cm de largo cortados en secciones de 3 cm, a efecto de reproducir mejor la estructura real. Sobre una fina capa de arena se disponen las columnas y se someten en la mesa sísmica a un impulso -movimiento brusco en horizontal- que reproduce la llegada del pulso sísmico predominante. Las columnas caerán en sentido contrario al de llegada de la onda sísmica, señalando así su origen (dirección y sentido de llegada). Podemos reproducir más fidedignamente su comportamiento si disponemos sobre las columnas dinteles u otras estructuras, como tejados. En este caso, el comportamiento solidario de toda la estructura puede variar la dirección de caída, pero reproduce fielmente los comportamientos observados en la realidad (Fig. 14; ver figura 6).

#### Caída de claves de arco y proyección de tímpanos y dovelas

Se trata de uno de los efectos cosísmicos más destacables. Para modelizar este proceso necesitaremos un arco de medio punto que podemos construir con piezas de madera, aunque también puede adquirirse en tiendas de material de laboratorio o modelismo. Sujetamos el arco sobre la mesa sísmica y sometemos ésta a vibración manualmente; al cabo de unos segundos puede observarse cómo comienzan a desplazarse las dovelas y sillares del muro hacia fuera y cómo se desliza hacia abajo la clave del arco (Figura 15; ver figura 7). Podemos variar la orientación del arco respecto a la dirección de llegada de las ondas y comprobar el diferente comportamiento del mismo en función de ese ángulo según Giner-Robles et al (2009) validando, *grosso modo*, lo deducido de la realidad.

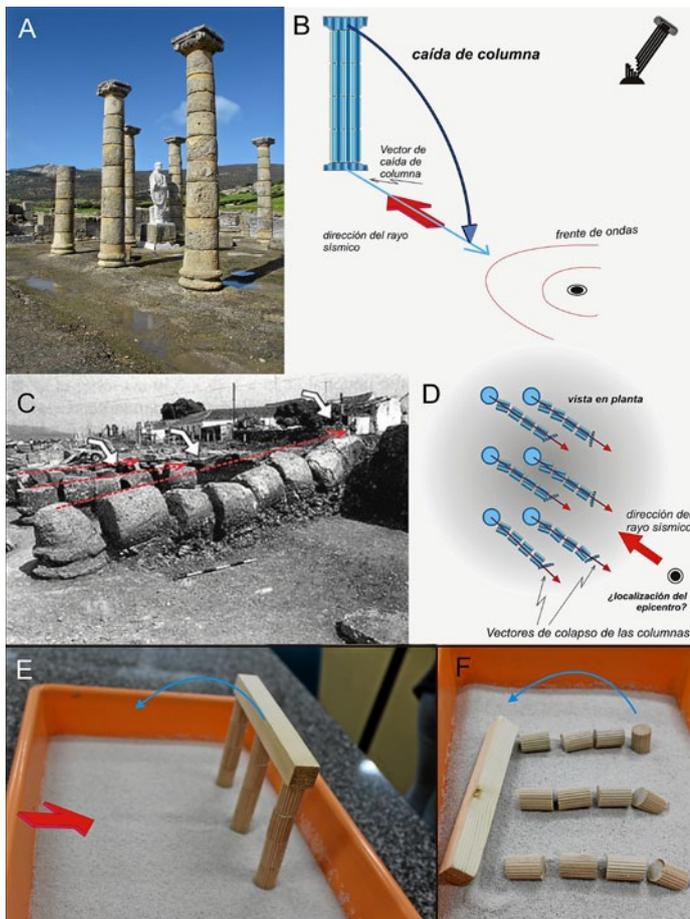


Fig. 14. A) Columnas de la Basílica de Baelo Claudia actualmente restauradas; B) comportamiento de columnas ante un sismo según Giner-Robles et al. (2009); C) en 1997, Sillières tomó la fotografía; las columnas habían caído sobre “suelo barrido”, es decir, que la ciudad estaba habitada cuando se produjo el colapso, e indicaban al Oeste, zona donde se encuentra el Cabo de Gracia, donde posiblemente se localizó el foco del sismo; D) modelo de caída orientada de columnas según Giner-Robles et al. (2009); E) modelización en laboratorio. La flecha roja indica la dirección de llegada de la onda; F) las columnas colapsadas por efecto del terremoto (que en el modelo miden 12 cm) actúan como vectores indicadores del origen del sismo.

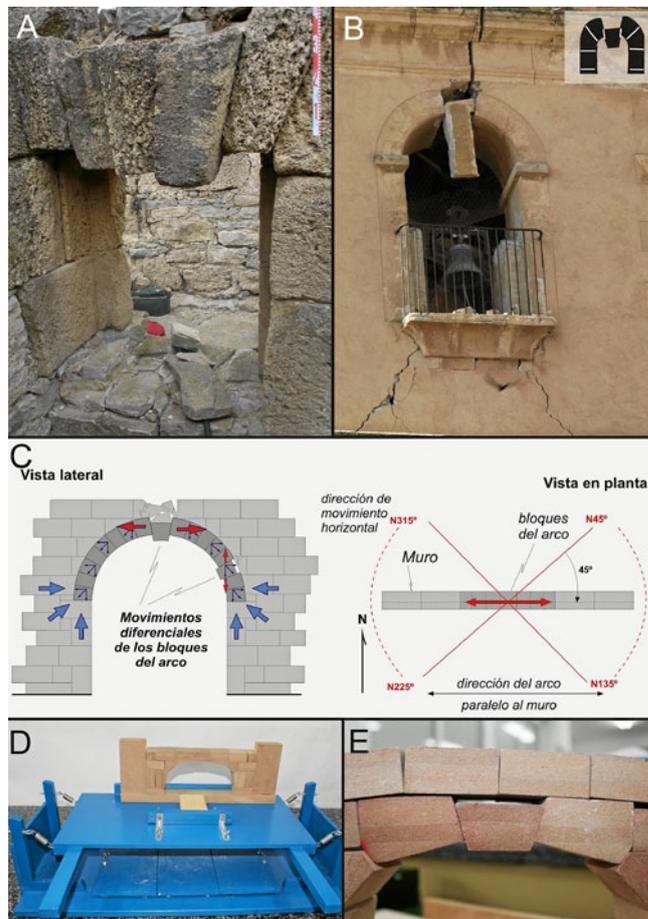


Fig. 15. Caída de claves de arco. A) Ventana del foro de la ciudad Romana de Baelo Claudia; B) clave de arco caída en el campanario de la Iglesia del Paso Azul en Lorca, generada por el terremoto del mayo 11 de 2011; C) comportamiento teórico de arcos cuando el eje del dintel es paralelo a la dirección de llegada de la onda según Giner-Robles et al. (2009); D) reproducción en laboratorio, con un arco romano (40 cm de largo) hecho con piezas de madera sueltas, se somete a un choque sísmico en la mesa, apreciándose el mismo comportamiento de los bloques; E) caída de clave.

### Pliegues y deformaciones en muros

Los muros representan estructuras muy sensibles a los movimientos sísmicos (Fig. 17). En función de la fábrica (tipo y materiales de construcción) y de la presencia de bloques que los sujeten en los extremos (anclaje), se comportarán de uno u otro modo. La presencia de bloques más resistentes reduce la oscilación del muro favoreciendo el plegamiento.

En función de la libertad y disponibilidad de espacio de los elementos del muro durante la vibración, se deformará de una u otra forma. Si los bordes están formados por elementos resistentes (Fig. 16B), se favorecerá el plegamiento.

Podemos experimentar con la deformación que sufren los muros sometiéndolos a diferentes pruebas. Si sobre una lámina de “goma eva” colocamos un muro (también pueden construirse escalones)



Fig. 16. A) Tiendas del foro de la ciudad romana de Baelo Claudia en el sector Este, los ejes azules indican los ejes de plegamiento del muro; B) deformación con simulación de ondas Rayleigh sobre lámina de “goma eva” movida por un tubo.



Fig. 17. Construcción idealizada con los Efectos Arquitectónicos de Terremotos (EAEs) teóricos que generaría un movimiento sísmico con un desplazamiento del sustrato en dirección NO-SE.

y deslizamos un tubo por debajo de la lámina, se aprecia la deformación permanente que sufre la estructura, en un modelo que reproduce la observada en la realidad. También podemos disponer un muro sujeto por uno de sus extremos y someterlo a un movimiento horizontal brusco, observando cómo se producen pliegues en el mismo (Fig. 16).

### Efectos del estudio de los EAEs a la conservación del Patrimonio Cultural

Como se ha expuesto en los apartados anteriores, los EAEs no se forman de manera aleatoria sino que siguen patrones de deformación condicionados por la llegada del pulso sísmico predominante. Esto hace que, si conocemos la presencia de fallas activas en las proximidades de una localidad, podamos llegar a crear un modelo de deformación teórico que podría generar un hipotético terremoto. Además, la geología, mediante la paleosismología, será capaz de saber cuál será el terremoto máximo esperado de dicha falla, por lo que podremos conocer de antemano cuál será la energía máxima que podría liberar. La arqueosismología también puede diferenciarnos distintos terremotos acaecidos en el pasado, ya que si la misma falla ha generado diferentes terremotos, las deformaciones que generó serán las mismas y un mismo EAE se habrá movido varias veces. Esto es lo que se conoce como reactivación de EAEs (Rodríguez-Pascua, et al., 2012a) y nos permite determinar una sucesión sísmica mediante la arqueosismología, y asignar los terremotos deducidos a una o varias fallas, dependiendo de sus características.

Todos estos datos, cruzados con la paleosismología, nos da la posibilidad de crear modelos predictivos de deformación en el patrimonio. De este modo, si suponemos una construcción hipotética (Fig. 17) que fuese sometida a las deformaciones producidas por un terremoto generado por una falla conocida, estas deformaciones estarían condicionadas por la orientación de la construcción. Así pues, si esta construcción sufre un movimiento del terreno perpendicular al eje central de la nave, aparecerán caídas de claves de arco en la fachada principal, pero no en las ventanas de la pared perpendicular. También se desarrollarán fracturas conjugadas en esta fachada, mientras que en los muros

perpendiculares aparecerán fracturas horizontales. Las caídas de pináculos serán paralelas a la dirección de movimiento, así como las caídas orientadas de muros.

Por este motivo, el estudio de las fallas activas en el entorno de un conjunto patrimonial, en relación a la orientación del mismo, facilita el desarrollo de modelos predictivos de comportamiento sísmico. Estos podrán ser útiles tanto en los planes de conservación como en posibles intervenciones de restauración.

## CONCLUSIONES

La arqueosismología es una técnica multidisciplinar que permite tanto inventariar terremotos no registrados históricamente, como predecir cual será el comportamiento del patrimonio ante un terremoto. Esto es posible gracias a la clasificación de EAEs y su análisis estructural geológico, con el que obtendremos los elipsoides y trayectorias de deformación de un conjunto patrimonial. Combinando la arqueosismología con la paleosismología se pueden calcular los terremotos máximos esperados para una zona y conocer de que forma podrán afectar al patrimonio, lo cual podrá ser incluido en los planes de actuación contra el riesgo y proteger nuestro patrimonio. Con los recursos docentes que se presentan en este trabajo se puede, de una manera simple, no solo modelizar en el laboratorio efectos arqueosismológicos, sino realizar pequeñas investigaciones que contrasten los datos obtenidos en campo que estimulen al alumnado en el estudio de los terremotos.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer las aportaciones de los dos revisores, Andrés Díez Herrero y Juan Miguel Ínsua Arévalo, que han mejorado y enriquecido este manuscrito. Este trabajo de ha financiado con los proyectos del Plan Nacional RESCATELO (CGL2011-14925-E).

## BIBLIOGRAFÍA

- Brusi, D., Alfaro, P. y González, M. (2011). El cine de catástrofes naturales como recurso educativo. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 19.2, 193-203.
- De la Hoz, J.D. (2012a). Terremoto en Lorca: consecuencias y actuaciones sobre el patrimonio religioso. *Patrimonio Cultural de España*, 6, 107-122.
- De la Hoz, J.D. (2012b). Efectos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 sobre el patrimonio religioso. Análisis de emergencia y enseñanzas futuras. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 515-536.
- Galbis Rodríguez, J. (1932). *Catálogo Sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5° E y 20° W de Greenwich y los paralelos 45° y 25° Norte*, Tomo I. Instituto Geográfico Catastral y de Estadística, Madrid, 818 p.

- Galbis Rodríguez, J. (1940). *Catálogo Sísmico de la zona comprendida entre los meridianos 5° E y 20° W de Greenwich y los paralelos 45° y 25° Norte*, Tomo II. Instituto Geográfico Catastral y de Estadística, Madrid, 280p.
- Giner-Robles, J.L., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Bardají, T., Grützner, C. y Reicherter, K. (2009). *Structural Analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain)*. Instituto Geológico y Minero de España, 130 p.
- Giner-Robles, J.L., Silva Barroso, P.G., Pérez-López, R., Rodríguez-Pascua, M.A., Bardají Azcárate, T., Garduño-Monroy, V.H., y Lario Gómez, J. (2011). *Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI*. Serie Investigación. Fundación MAPFRE, 96 p.
- Giner-Robles, J.L., Pérez-López, R., Silva Barroso, P., Rodríguez-Pascua, M.A., Martín-González, F. y Cabañas, L. (2012). Análisis estructural de daños orientados en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Aplicaciones en Arqueoseismología. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 503-513.
- Guidoboni, E. (1989). *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea: storia, archaeologia, sismologia*. Bologna. SGA-Instituto Nazionale di Geofisica. 765 p.
- IPCE (2012). *Patrimonio en riesgo: seísmos y bienes culturales*. Patrimonio Cultural de España, 6, 268 p.
- Lanciani, R. (1918). Segni di Terremoti negli edifici di Roma Antica. *Bull. Della Comm. Arch. Comunale Roma*, 1-30.
- Lyell, C. (1872). *The Principles of Geology. The modern changes of the earth and its inhabitants*. London. Vol. II, 456p.
- Martínez-Díaz, J.J., Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., García Mayordomo, J., Giner Robles, J.L., Martín-González, F., Rodríguez Peces, M., Álvarez Gómez, J.A., e Insua Arévalo, J.M. (2011). *Informe Geológico Preliminar del Terremoto de Lorca del 11 de mayo del año 2011, 5.1 Mw*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 35 p.
- Martínez-Solares, J.M. y Mezcuca, J. (2002). *Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900)*. Instituto Geográfico Nacional. Ministerio de Fomento, 756 p.
- Martínez-Vázquez, F. (1999). *El terremoto de Lisboa y la Catedral de Coria (Vicisitudes del Cabildo) 1755-1759*. Colección Temas Cauriaciencas. Vol. V. Ed. Ayuntamiento de Coria, 187 p.
- Muñoz Clares, M. Fernández Carrascosa, M., Alcolea López, M.O., Arcas Navarro, M.C., Arcas Ruiz, N., Caro del Vas, P., Cruz López, M.T., García Poveda, M., García Valera M. A., Llamas Martínez, B. y Ruiz Llanes, A. E. (2012). Sismicidad histórica y documentación municipal: el caso de Lorca. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 415-429.
- Nikonov, A. (1988). *On the methodology of archaeological research into historical monuments*. En: Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites (Eds.: G. Marinis y G. Koukis). Balkema, Rotterdam, 1325-1320.
- Rapp, G. (1982). *Earthquakes in the Troad*. En: Troy: The archaeological Geology (Eds.: G. Rapp and J.A. Gifford). Princeton, 43-58.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Abad Casal, L., Pérez-López, R., Gamó Parra, B., Silva, P.G., Garduño-Monroy, V.H., Giner-Robles, J.L., Israde-Alcántara, I., Bischoff, J. y Calvo, J.P. (2009). Roman, visigoth and islamic evidence of earthquakes recorded in the archaeological site of El Tolmo de Minateda (Prebetic Zone, Southeast of Spain). *1st INQUAIGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th- 13th September, 110-114*.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Silva, P.G., Garduño-Monroy, V.H., Pérez-López, R., Israde-Alcántara, I., Giner-Robles, J.L., Bischoff J. y Calvo, J.P. (2010). *Ancient earthquakes from archaeoseismic evidence during the Visigothic and Islamic periods in the archaeological site of "Tolmo de Minateda" (SE of Spain)*. En: Ancient Earthquakes. (Eds.: M. Sintubin, I.S. Stewart, T.M. Niemi y E. Altunel). *Geological Society of America, Special Paper*, 471, 171-184.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H., y Reicherter, K. (2011). A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for Archaeoseismology. *Quaternary International*, 242, 20-30.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Martín-González, F., Giner-Robles, J.L. y Silva, P.G. (2012a). Efectos arquitectónicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Neoformación y reactivación de efectos en el Patrimonio Cultural. *Boletín Geológico y Minero*, 123 (4), 487-502
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Giner-Robles, J.L., Martín-González, F. y Silva, P.G. (2012b). Poligenetic sand volcanoes generated by a single event: the earthquake of the Emilia Romagna (2012/05/20; Mw=5.9) (Italy). *3rd INQUA-IGCP-567 International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology and Archaeoseismology, Morelia, Mexico*, 165-168.
- Sintubin, M. y Stewart, I. S. (2008). A Logical Methodology for Archaeoseismology: A Proof of Concept at the Archaeological Site of Sagalassos, Southwest Turkey. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98 (5), 2209-2230.
- Silva, P.G., Borja, F., Zazo, C., Goy, J.L., Bardají, T., De Luque, L., Lario J. y Dabrio, C.J. (2005). Archaeoseismic record at the ancient Roman City of Baelo Claudia (Cádiz, south Spain). *Tectonophysics*, 408 (1-4), 129-146.
- Silva, P.G., Reicherter, K., Grützner, Ch., Bardají, T., Lario, J., Goy, J.L., Zazo, C. y Becker-Heidmann, P. (2009). Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolonia Bay area, Cádiz (south Spain). *Geological Society of London, Special Publication*, 316, 93-121.
- Stiros, S. (1988a). Earthquake effects on Ancient Constructions. En: New Aspect of Archaeological Science in Greece (Eds.: R.E. Jones y H.W. Catling). *British Schools at Athens, Fitch Occasional Paper*, 3, 1-6.
- Stiros, S. (1988 b). Archaeology, a tool to study active tectonics – The Aegean as a case study. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 13, 1636-1639.
- Stiros, S. y Jones, R.E. (1996). Archaeoseismology. Institute of Geology and Mineral Exploration. *Fitch Laboratory Occasional Paper*. (Eds.: S. Stiros y R.E. Jones), Atenas. 268 p.
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J. y Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 295-302.
- Zang, B., Liao, Y., Guo, S., Wallace, R. Buckham, R. y Hanks, T. (1986). Fault scarps related to the 1739 earthquake and seismicity of the Yinchuan graben, Ningxia Zizhiqu, China. *Bull. Soc. America*. 76, 1253-1287. ■

Fecha de recepción del original: 17/01/2013  
 Fecha de aceptación definitiva: 23/03/2013