

Patrimonio sísmico en yacimientos arqueológicos y edificios históricos

# *La* ARQUEOSISMOLOGÍA *como ciencia emergente*



La arqueosismología estudia terremotos del pasado mediante el análisis de yacimientos arqueológicos, aportando datos inéditos sobre sismos que pueden incluso no haberse registrado históricamente. Estos datos pueden ser de gran ayuda a la hora de considerar la peligrosidad sísmica de zonas relativamente estables con periodos de retorno de sismos destructivos elevados, como es el caso de la península Ibérica.



Por **J.L. GINER-ROBLES**. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular Interino. Departamento de Geología y Geoquímica. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. Campus de Cantoblanco. Cantoblanco 28049, Madrid. e-mail: jorge.giner@uam.es. **R. PÉREZ LÓPEZ**. Doctor en Ciencias Geológicas. Investigador Titular de OPI. Instituto Geológico y Minero de España. **P. SILVA BARROSO**. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Universidad de Salamanca. **M.A. RODRÍGUEZ-PASCUA**. Doctor en Ciencias Geológicas. Investigador Titular de OPI. Instituto Geológico y Minero de España. **T. BARDAJÍ AZCÁRATE**. Doctora en Ciencias Geológicas. Catedrática de Escuela Universitaria. Universidad de Alcalá de Henares. **J. LARIO GÓMEZ**. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular. Universidad Nacional de Educación a Distancia. **V.H. GARDUÑO MOROY**. Doctor en Ciencias Geológicas. Profesor Titular de Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Morelia, México).



latinstock

A lo largo de los años 80 y 90 del siglo pasado ha habido un gran desarrollo de trabajos multidisciplinares relacionados con los diferentes aspectos de la arqueosismología (Rapp, 1982; Stiros, 1988 a y b; Stiros y Jones, 1996; Nikonov, 1988; Guidoboni, 1989).

No obstante, uno de los principales problemas de esta nueva rama de la ciencia es que, debido a la relativa novedad de este tipo de análisis, no existen trabajos recopilatorios de referencia (excluyendo tal vez el de Stiros y Jones, 1996). Para suplir esta carencia, Rodríguez-Pascua *et al.* (2009, 2011) realizaron una recopilación bibliográfica de los principales efectos producidos por sismos en yacimientos arqueológicos de Europa y Asia, estableciendo una clasificación estructurada de los efectos sísmicos más comunes que se pueden observar en yacimientos arqueológicos (*Earthquake Archaeological Effects* o EAE) (Fig. 1).

El análisis de los efectos sísmicos en yacimientos arqueológicos o edificios históricos es un análisis multidisciplinar (Fig. 2), en el que se tienen que tener en cuenta aspectos fundamentales como la determinación de los procesos que pueden producir esas deformaciones, la datación de las estructuras de deformación o la documentación histórica disponible.

## Identificación de efectos arqueológicos de terremotos (EAE)

La identificación de los daños es uno de los pasos más importante en el análisis, ya que es en esta fase en la que se deben identificar de forma adecuada los efectos susceptibles de ser asignados a un origen sísmico. Para ello, es necesario realizar una búsqueda de documen-

a. EFECTOS COSÍSMICOS (DIRECTOS)		b. EFECTOS POSTSÍSMICOS (INDIRECTOS)		
EFECTOS GEOLÓGICOS	Efectos geológicos primarios	- Escarpes de falla	- Incendios	
	Efectos geológicos secundarios	- Levantamientos / hundimientos	- Abandonos injustificados	
EFECTOS EN LA FÁBRICA DE LAS CONSTRUCCIONES	Por deformación permanente del sustrato	- Licuefacciones	- Horizontes de destrucción o falta de registro estratigráfico en la secuencia arqueológica	
		- Deslizamientos	- Avenida súbita por roturas de presas artificiales o embalsamientos naturales	
		- Caída de bloques	EFECTOS CONSTRUCTIVOS	
		- Tsunamis/Seiches		- Construcciones antisísmicas
		- Colapsos en cavidades		- Reparación de construcciones
	Deformaciones instantáneas a la vibración	- Pavimentos de argamasa plegados	- Elementos de reciclado constructivo anómalos	
		- Fracturas y pliegues en enlosados regulares		
		- Fracturas y pliegues en enlosados irregulares		
		- Impactos entre el enlosado		
		- Contrafuertes desplazados y girados		
	- Muros basculados			
	- Muros plegados			
	- Muros desplazados			
	- Fracturas penetrativas en bloques de sillería			
	- Fracturas conjugadas en muros de estuco o ladrillo			
	- Columnas caídas y orientadas			
	- Giros en bloques de sillería y columnas			
	- Bloques de sillares desplazados			
	- Arcos desplazados			
	- Escalones y líneas de bordillo plegadas			
	- Muros colapsados (incluyendo restos humanos y objetos de valor bajo los escombros)			
	- Bóvedas colapsadas			
	- Marcas de Impacto			
	- Roturas en esquinas de bloques			

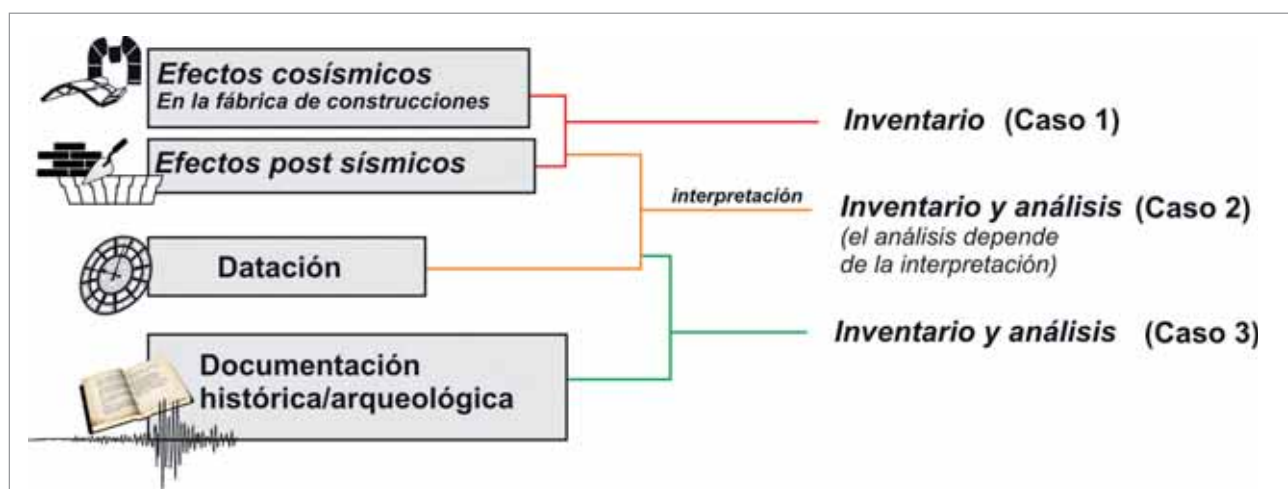
Figura 1. Tabla de clasificación de los efectos arqueológicos de terremotos (Earthquake Archaeological Effects o EAE) (modificado de Rodríguez-Pascua et al., 2009 y 2011): a) efectos cosísmicos: efectos producidos directamente por el evento sísmico (geológicos y en la fábrica de las construcciones); b) efectos postsísmicos: efectos indirectos producidos por las consecuencias del terremoto, ya sean visibles en el registro geoarqueológico (efectos de registro), o en las construcciones posteriores al evento sísmico (efectos constructivos).

tación histórica que nos indique si el emplazamiento a analizar (yacimiento o conjunto histórico) tiene relación expresa con un sismo histórico. De ser este el caso, entre la documentación histórica existente se han de extraer y localizar los efectos más significativos para su posterior análisis. En el caso de yacimientos antiguos en los que no se tenga constancia escrita de la ocurrencia de un terremoto, se deben revisar los informes de las excavaciones arqueológicas realizadas con el fin de documentar

posibles efectos arqueosismológicos. Por último, también es aconsejable poseer información acerca de los trabajos de restauración arqueológica y consolidación arqueológica más relevantes, con el fin de poder descartar del análisis las zonas reparadas y restauradas.

Para la identificación de daños se utiliza la clasificación de efectos arqueológicos de terremotos (EAE) propuesta por Rodríguez-Pascua (2009, 2011) (Fig.1), que diferencia entre efectos cosísmicos, que se producen como consecuencia directa del movimiento del terreno inducido por las ondas sísmicas (efectos geológicos y efectos en la fábrica de las construcciones), y efectos postsísmicos, que serían todos aquellos que muestran efectos posteriores a la ocurrencia del sismo o actuaciones de las sociedades afectadas para reparar los daños o minimizar los efectos de terremotos futuros. En esta identificación se deben tener muy en cuenta los estudios arqueo-

**La arqueosismología estudia terremotos del pasado mediante el análisis de yacimientos arqueológicos, aportando datos inéditos sobre sismos que pueden incluso no haberse registrado históricamente**



**Figura 2.** Esquema metodológico del estudio de un yacimiento/ciudad a partir de los efectos arqueológicos de terremotos (EAE), con la inclusión de posibles efectos geológicos (primarios y secundarios) y la posible determinación de escalas macrosísmicas (ESI-07), para la incorporación del evento a catálogos sísmicos y al cálculo de la peligrosidad en la zona considerada.

lógicos e históricos de la zona para, por un lado, interpretar correctamente las estructuras, y por otro, datar adecuadamente las mismas para poder asignarlas a un sismo concreto. Muchos de los efectos inventariados pueden tener un origen múltiple, incertidumbre que puede ser eliminada con el análisis de la cuantificación de la deformación.

Asimismo, los efectos postsísmicos pueden aportar abundante información que nos permita interpretar adecuadamente el origen de las deformaciones visibles, aunque no son susceptibles de ser analizados mediante técnicas de cuantificación de la deformación. Existen poblaciones en las que la ocurrencia de sismos destructivos queda patente en las construcciones y reparaciones realizadas con posterioridad a los mismos.

Un ejemplo paradigmático de este tipo de poblaciones es la ciudad de Morelia (antigua Nueva Valladolid), capital del Estado de Michoacán (México), en la que se ha podido establecer la utilización sistemática de medidas de construcción sismorresistente en la reconstrucción de edificios de sillería. Existe documentación de terremotos destruc-

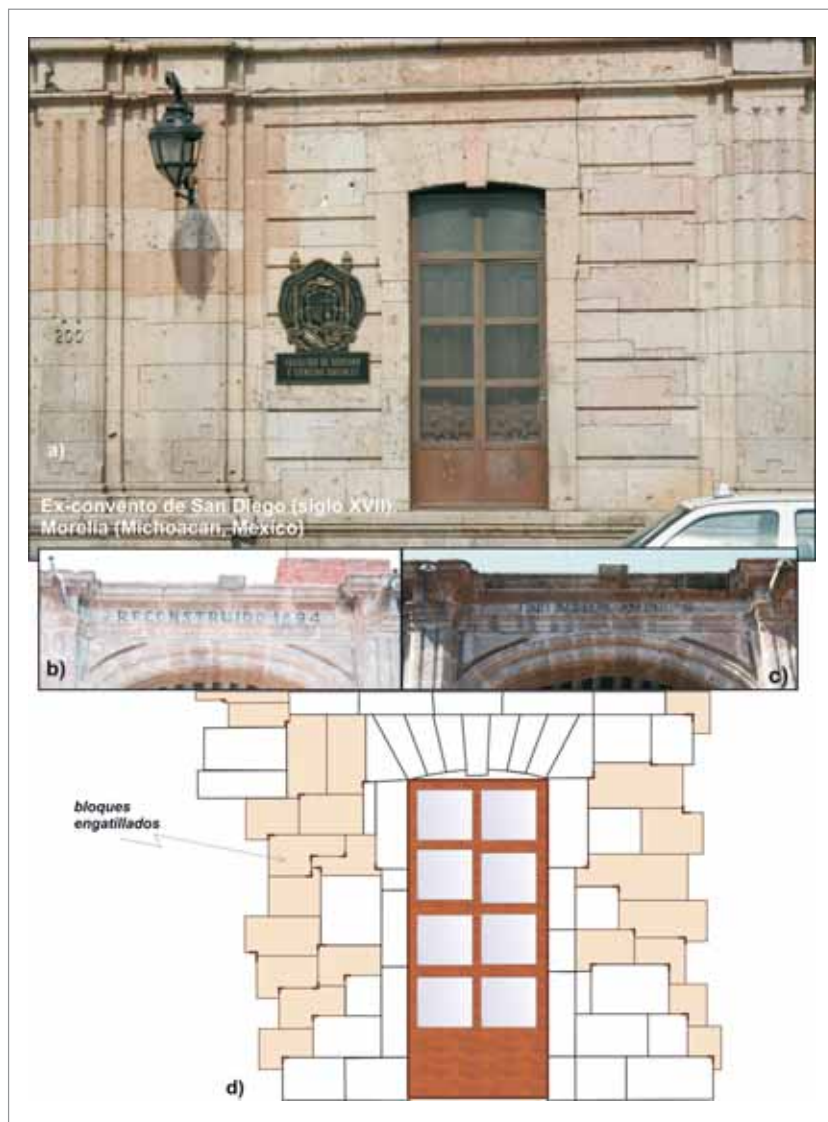
tivos que afectaron a extensas zonas de Michoacán, entre ellas la ciudad de Morelia, entre los siglos XVI y XIX.

En Morelia se han inventariado numerosos ejemplos de reconstrucciones de daños por sismicidad y la utilización de engatillados (efectos postsísmicos

en las construcciones) en edificios que datan de los siglos XVII y XVIII. Y aunque este tipo de construcción puede tener diversos orígenes, en esta ciudad mexicana se observan algunos ejemplos que ilustran el verdadero objetivo de la utilización de sillares engatillados: la



El convento de San Diego, en Morelia, presenta una fachada reconstruida mediante sillares engatillados a raíz del terremoto de 1858.



**Figura 3.** a) Detalle de la reconstrucción (1884) de la fachada el exconvento de San Diego (Morelia, México), con aplicación de medidas constructivas sismorresistentes; (b) la reconstrucción del mismo data de finales del siglo XIX (1895); (c) estado tras el gran terremoto de Pátzcuaro (1858), que asoló las poblaciones de Pátzcuaro y Morelia. En la reconstrucción de la fachada se observa la utilización sistemática de sillares engatillados (d).

reducción de los daños en infraestructuras inducidos por cargas horizontales de origen sísmico.

En concreto, podemos destacar la reparación del antiguo convento de San Diego, realizada con posterioridad al terremoto de Pátzcuaro, del año 1858, que registró una intensidad sísmica de IX (graduación sobre XII) en la escala MSK.

Este edificio religioso, cuya construcción data de mediados del siglo XVIII (1768) y que fue reconstruido en 1894 tras el mencionado terremoto, presenta en toda su fachada la utilización sistemática de sillares engatillados, rompiendo completamente la horizontalidad de las hiladas, especialmente en la planta baja (Fig. 3).

## Análisis de la deformación de EAE

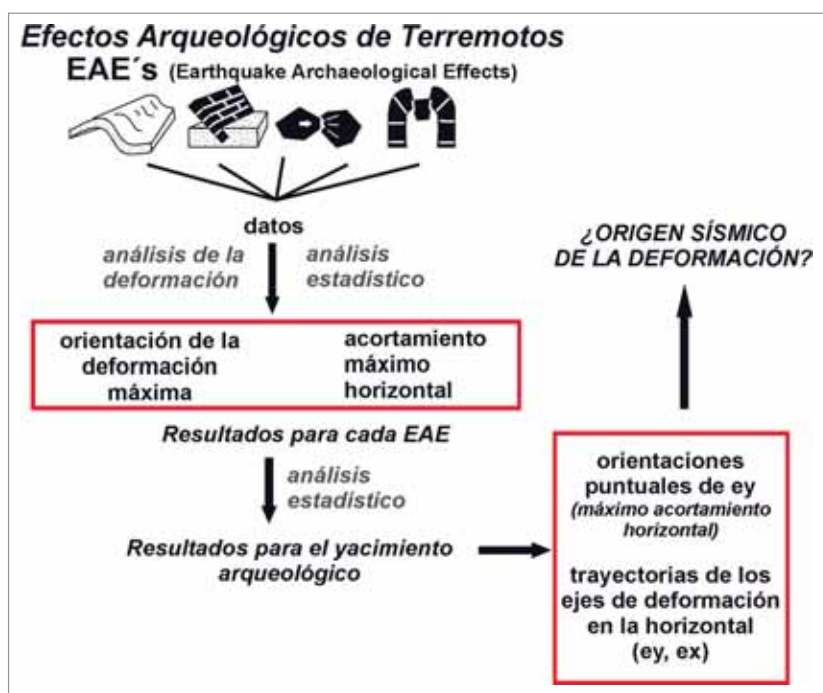
La cuantificación de la deformación de los efectos arqueológicos de terremotos se basa en el análisis de los EAE susceptibles de aportar información sobre el proceso de deformación que los ha producido o inducido; es decir, los efectos cosísmicos: tanto los efectos geológicos (a) como los efectos en la fábrica de las construcciones (b) (ver Fig. 1).

Para realizar el análisis de la deformación de estructuras geológicas (a, efectos geológicos) se utilizan las técnicas clásicas de geología estructural, que nos permiten establecer los tensores de deformación que han producido los daños.

**El estudio de estructuras situadas en diferentes localidades que han sufrido daños por efecto lejano del mismo terremoto nos permite analizar parámetros focales del sismo con respecto a la orientación y direccionalidad de los daños observados**

En este artículo se presenta la metodología desarrollada para cuantificar la deformación inducida por sismicidad en la fábrica de las construcciones. Para realizar este análisis se aplican técnicas similares a las utilizadas en geología estructural. Los resultados del estudio permiten establecer el grado de homogeneidad presente en las deformaciones susceptibles de haberse originado por actividad sísmica, de forma que se pueda reducir la incertidumbre en la identificación de los procesos que han originado las deformaciones inventariadas.

La metodología aplicada al análisis de la deformación de los efectos sísmicos en



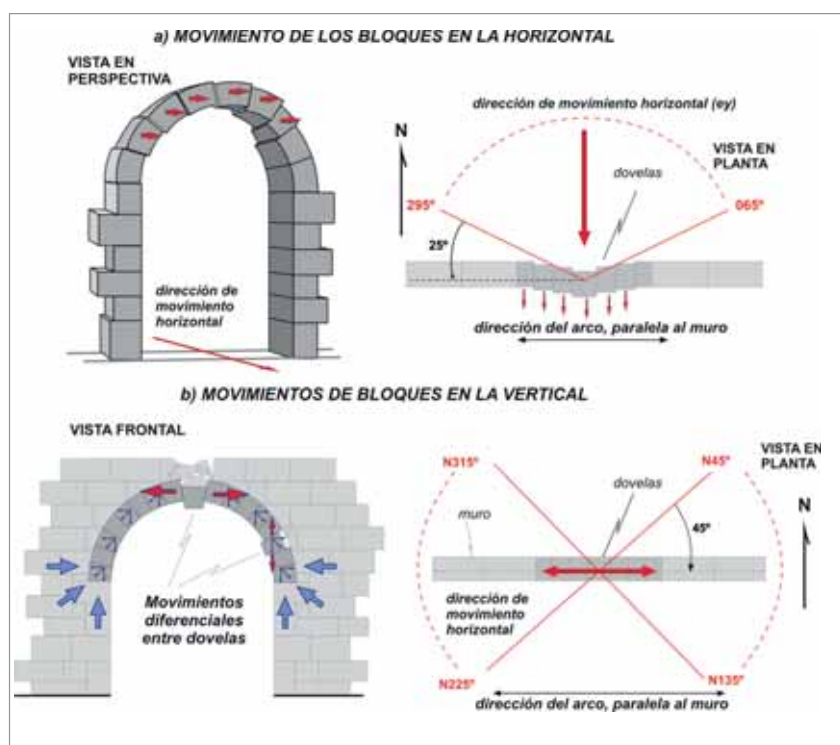
**Figura 4.** Esquema metodológico propuesto por Giner-Robles *et al.* (2009) para el análisis cuantitativo de las deformaciones presentes en estructuras de un yacimiento arqueológico (EAE) (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2009, 2011). Una vez realizado este análisis, los resultados se estudian con el resto de la información del yacimiento: efectos postsísmicos, datación de deformaciones, análisis de documentos históricos, etc. (ver Fig. 2).

la fábrica de las edificaciones en yacimientos arqueológicos consta de una serie de fases (Giner Robles *et al.*, 2009) (Fig. 4):

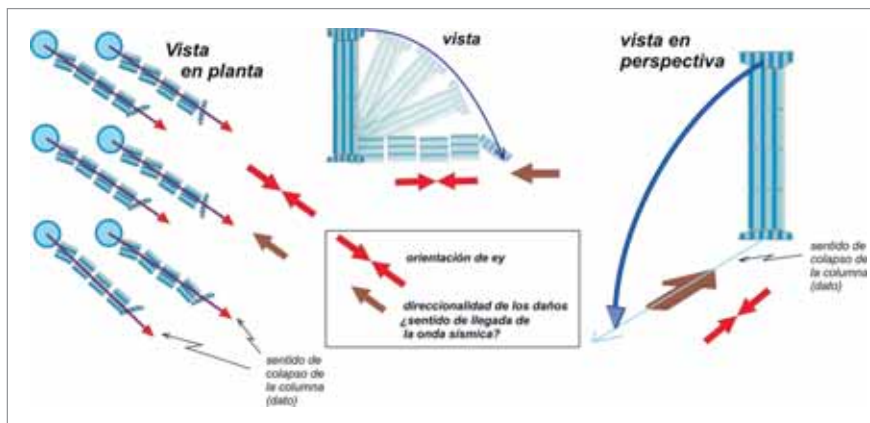
- Caracterización de los datos. Antes de analizar las deformaciones observadas, debemos considerar una serie de aspectos relacionados con los datos que vamos a recopilar. Estos aspectos se centran tanto en la definición de los parámetros analizables para obtener los datos del tensor de deformación como en la caracterización adecuada de la cinemática de las deformaciones.
- Cuantificación de la deformación en cada estructura analizada aplicando técnicas de análisis estructural geológico. Se define la orientación del tensor de deformación, caracterizado por

sus dos ejes principales en la horizontal ortogonales entre sí:  $e_y$  (dirección de máximo acortamiento horizontal) y  $e_x$  (dirección de mínimo acortamiento horizontal).

- Análisis de los tensores definidos para cada uno de los EAE (un solo resultado para cada tipo de estructura descrita en el yacimiento), de forma que se pueda analizar la coherencia de los datos en todo el yacimiento en función del tipo de estructura.
- Análisis conjunto del yacimiento, de forma que se pueda evaluar y en su caso establecer la homogeneidad de los resultados en el conjunto del yacimiento, y por tanto poder establecer el origen de las deformaciones. En las figuras 5 y 6 se observan algunos ejemplos de la interpretación cine-



**Figura 5.** Esquemas idealizados del análisis de la deformación en arcos y dinteles. a) Deformaciones de origen sísmico que inducen el movimiento horizontal de las dovelas; la dirección de máximo acortamiento horizontal ( $e_y$ ) se analiza de forma similar a la de los muros basculados. b) Deformaciones de origen sísmico que inducen el hundimiento de dovelas de arco; la dirección de  $e_y$  se sitúa en un ángulo menor de 45° con respecto al plano del muro que contiene el arco.



**Figura 6.** Análisis de la deformación en estructuras de caídas orientadas de columnas. La dirección de máximo acortamiento horizontal ( $xy$ ) es paralela al sentido de caída de las columnas. En este caso se puede establecer incluso la direccionalidad de los daños, definida por el sentido de caída de la columna.

ceptibles de ser analizadas. Entre ellas cabe destacar el desplazamiento de sillares en las columnas laterales que sustentan la nave central (Fig. 7), daño del que se tiene constancia histórica. Estos desplazamientos se pueden analizar como vectores de desplazamiento, determinando directamente la dirección de máximo acortamiento horizontal ( $xy$ ) (paralela al vector), e incluso la direccionalidad de los daños (en este caso hacia el suroeste).

mática de estructuras que nos permiten establecer la orientación del tensor de deformación que los ha producido.

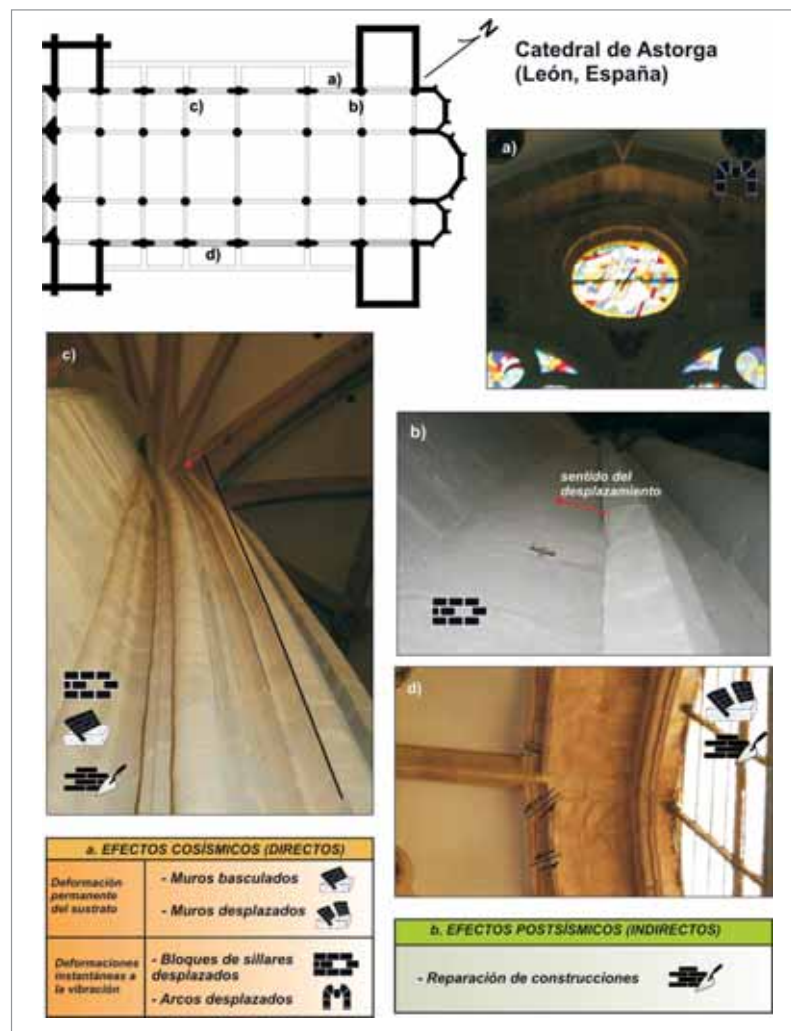
### Ejemplos de la aplicación de la metodología

A continuación se describen algunos ejemplos de la aplicación de esta metodología en algunos monumentos y yacimientos arqueológicos de la península Ibérica (Giner-Robles *et al.*, en prensa).

#### Catedral de Astorga (León)

Su construcción se inició en el siglo XV y sufrió importantes daños como consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755. Numerosos daños están descritos en la misiva del Alcalde Mayor de Astorga a la corte el 21 de noviembre de 1755, 20 días después del terremoto (Martínez Solares, 2001).

Muchos de estos daños ya no son visibles porque fueron reparados, como el claustro, que fue reconstruido totalmente tras el terremoto. No obstante, todavía son visibles estructuras cosísmicas sus-



**Figura 7.** Efectos cosísmicos en el interior de la catedral de Astorga (León). a) Deslizamiento de las dovelas de un pequeño rosetón en una de las capillas laterales. b) Desplazamiento decimétrico de los sillares de una de las columnas que separa la nave de crucero de la nave central de la catedral. c) Desplazamiento acumulado de los sillares que conforman una de las columnas, desplazamiento visible incluso con evidencias de reparaciones importantes. d) Desplazamientos de sillares en la conexión de la nave central con uno de los ventanales orientados al sur.



Las catedrales de Astorga (izquierda) y Coria (derecha) registraron múltiples daños como consecuencia del terremoto de Lisboa de 1755.

Otro de los efectos visibles es el hundimiento de las dovelas superiores de un pequeño rosetón situado en el luneto de la capilla norte del crucero de la catedral (Fig. 7a).

#### **Catedral de Coria (Cáceres)**

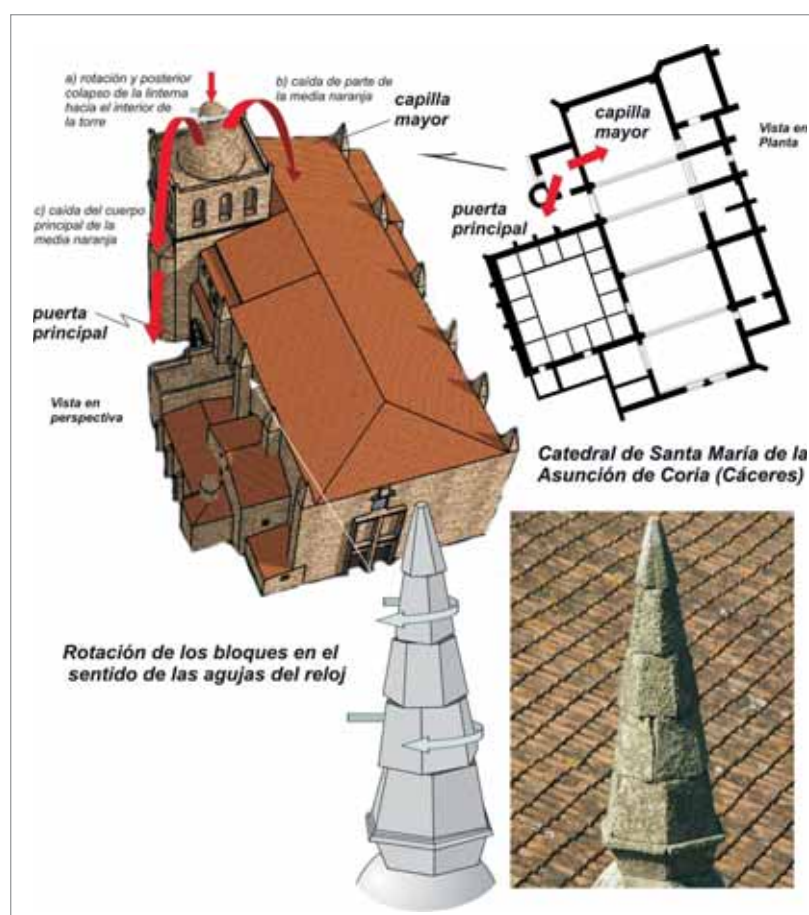
La catedral de Santa María de la Asunción de Coria (Cáceres), construida entre los siglos XV y XVIII, sufrió graves daños por el terremoto de Lisboa de 1755.

En algunos casos las descripciones históricas son tan detalladas que nos permiten reconstruir algunos eventos relacionados con el sismo que pueden proporcionar mucha información, e incluso permitirnos mejorar el análisis de los efectos cosísmicos visibles.

En el caso de esta catedral, la descripción del colapso de la linterna y de la media naranja de la torre detalla claramente los daños (carta del obispo de Coria remitida a la corte el 7 de noviembre de 1755 describiendo los daños en la catedral) (Martínez Solares, 2001) (Fig. 8). La presencia de estructuras de rotación en alguno de los pináculos de la catedral (Martínez Vázquez, 1999) nos hace pensar que el colapso de la linterna se debió a la rotación de la misma con respecto a la cúpula de la media naranja, provocando el colapso vertical de la misma.

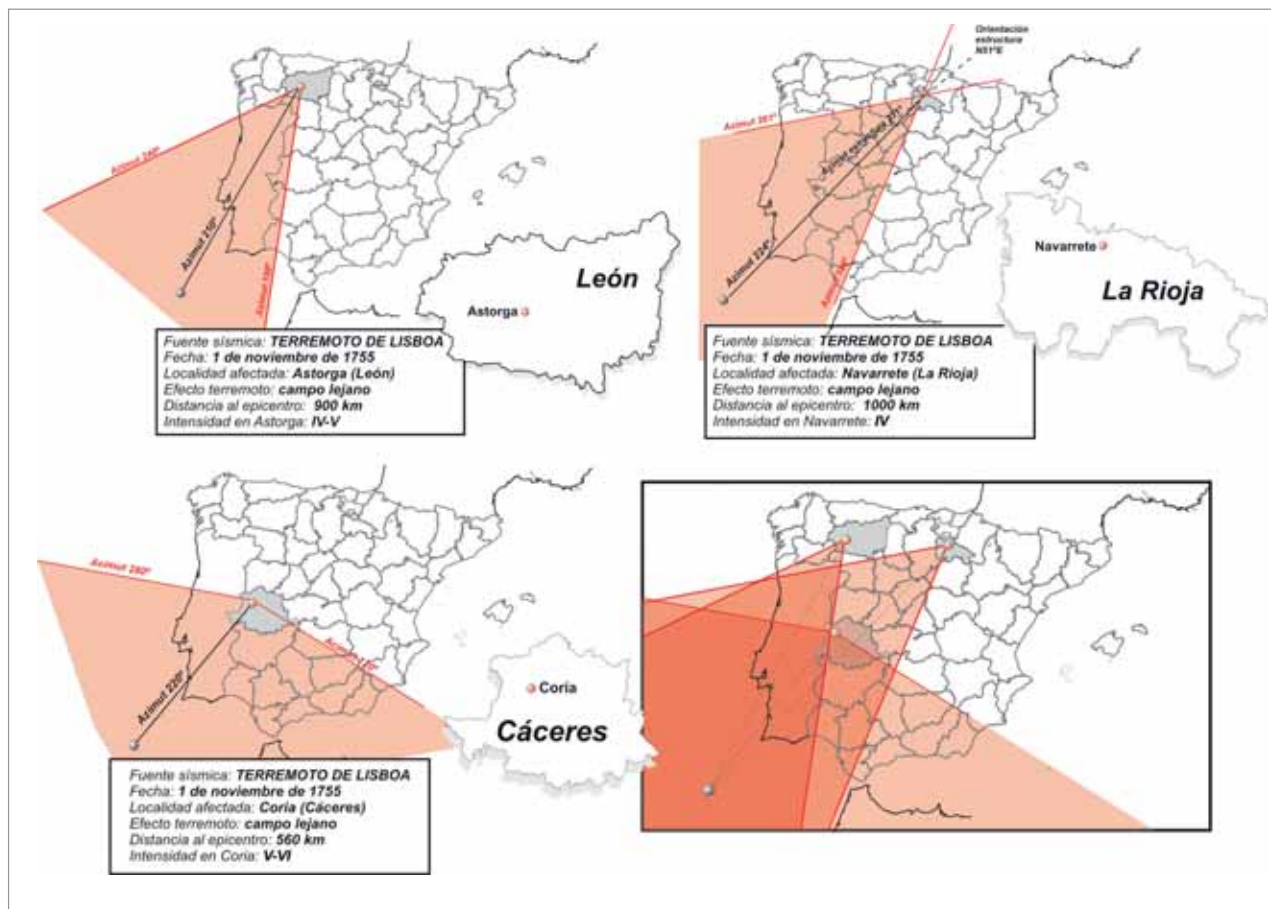
#### **Análisis conjunto de localidades**

El análisis de puntos o estructuras situados en diferentes localidades penin-



**Figura 8.** Interpretación de los daños sufridos por la estructura superior (linterna y media naranja) de la torre de la catedral de Santa María de la Asunción de Coria (Cáceres) como consecuencia del terremoto de Lisboa. Sin la descripción histórica de los daños, no podríamos determinar el rango de orientaciones de máximo acortamiento horizontal ( $\epsilon_y$ ) para este colapso, al no contar con efectos cosísmicos visibles en la actualidad, ya que muchos de ellos han desaparecido como consecuencia de las reparaciones realizadas con posterioridad al sismo. Detalle de una estructura de rotación presente en uno de los pináculos de la catedral (Martínez Vázquez, 1999). Se observa la rotación siniestra (en sentido contrario a las agujas del reloj) de los sillares que conforman este pináculo. La descripción del colapso de la linterna de la torre nos hace pensar que se debió a la rotación previa de la linterna sobre la cúpula de la media naranja.





**Figura 9.** Análisis de los daños del terremoto de Lisboa de 1755. Comparación de los resultados de orientación de ey deducidos de los resultados puntuales obtenidos de tres poblaciones: Navarrete (La Rioja), catedral de Astorga (Astorga, León) y catedral de Coria (Cáceres). Los resultados muestran coherencia con la posición más probable del terremoto de Lisboa (círculo gris).

sulares que han sufrido daños por efecto lejano del terremoto de Lisboa, como es el caso de los ejemplos anteriores, nos permite estudiar parámetros focales del sismo con respecto a la orientación y direccionalidad de los daños observados (Fig. 9).

No obstante, en este caso son pocos datos y de campo lejano como para poder obtener conclusiones fiables de estos datos, pero en conjunto se muestra que las orientaciones de ey deducidas a partir del análisis de efectos arqueosísmológicos en estas localidades permiten deducir las orientaciones preferentes del movimiento del terreno durante este terremoto.

#### **Yacimiento romano de Baelo Claudia (Cádiz)**

En el yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz) estudios previos habían definido la ocurrencia de dos sismos sin referencia histórica en el periodo comprendido entre los siglos I y III a.C. (Silva *et al.*, 2005). El análisis de este yacimiento se ha llevado a cabo mediante la colaboración multidisciplinar entre diferentes expertos (arqueólogos, historia-

dores, geólogos, arquitectos,...), colaboración que ha permitido el reconocimiento de diferentes daños y efectos asimilables a la ocurrencia de sismos próximos a este enclave, en especial los datos arqueológicos (por ejemplo, abandonos de partes de la ciudad, presencia de horizontes de destrucción, etc.).

Entre los efectos reconocibles en el yacimiento se encuentran tanto efectos cósmicos como postsísmicos. Los efec-

**La identificación y el inventario de efectos de terremotos antiguos en el patrimonio histórico y arqueológico pueden concienciar a la población de la peligrosidad sísmica**

tos cosísmicos observados muestran casi la totalidad de los representados en la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2009, 2011) (Fig. 10).

El análisis de la deformación presente en los EAE localizados en este yacimiento responde a la necesidad de cuantificar estas deformaciones para poder corroborar la hipótesis de la ocurrencia de sismos destructivos en este yacimiento propuesta a partir de otras técnicas y análisis multidisciplinares (Silva *et al.*, 2009).

La aplicación del análisis de la deformación al enclave de *Baelo Claudia* se

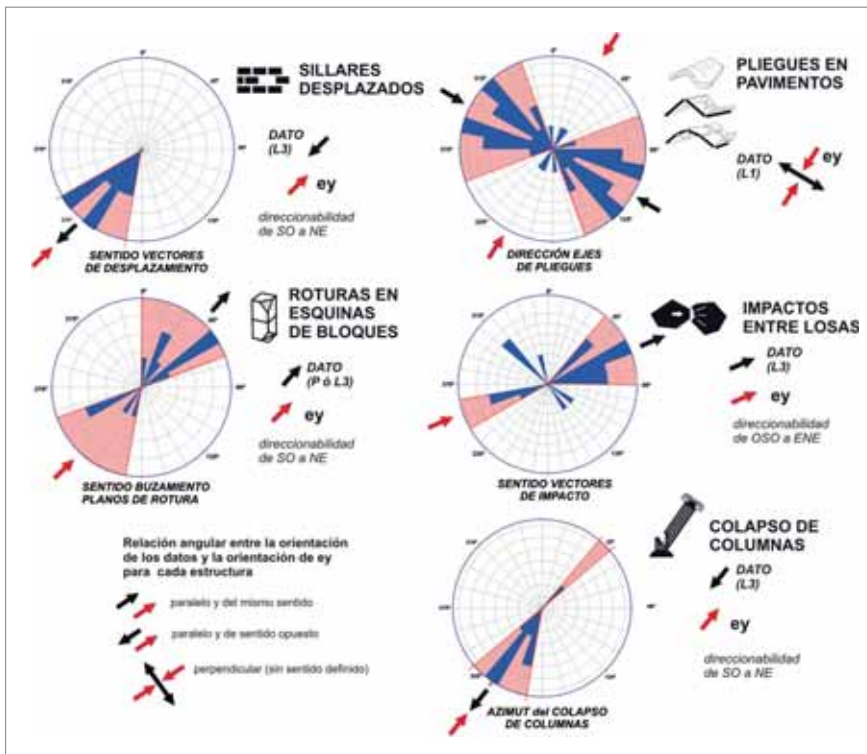


Los análisis permiten identificar el origen sísmico de las deformaciones de los restos del yacimiento romano de *Baelo Claudia*.



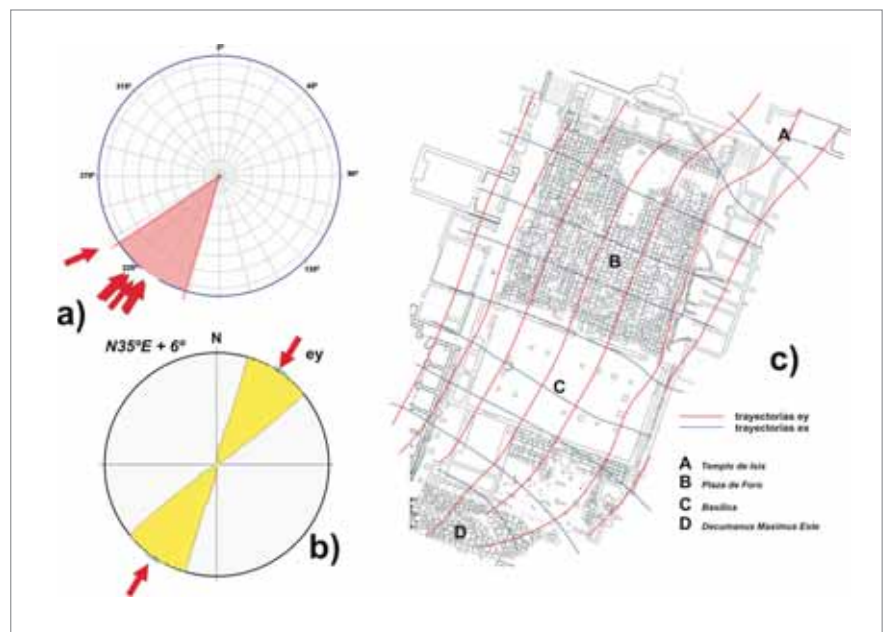
ha centrado, en primer lugar, en el inventario de todos los EAE de la zona del yacimiento. Una vez inventariadas todas las deformaciones asimilables a eventos sísmicos, se determinó la orientación de la dirección de máximo acortamiento horizontal ( $\epsilon_y$ ) de cada una de las estructuras individuales. Posteriormente se realizó un análisis de la deformación por cada tipo de EAE para todo el yacimiento (Fig. 11).

**Figura 10.** Efectos cosísmicos en la fábrica de las construcciones inventariados en el yacimiento romano de *Baelo Claudia* (Cádiz). a) Caída orientada de columnas afectando a los muros de la basílica en la zona del Foro de *Baelo Claudia* (Silleries, 1997). En muchos casos es necesario consultar el material original de las excavaciones arqueológicas para poder definir los diferentes efectos correctamente. b) En este caso, la zona de la basílica ha sido restaurada y las columnas situadas en su posición original antes del colapso. c) Fragmento de la muralla oriental de la ciudad, plegada y basculada. En algunas ocasiones podemos encontrar dos efectos en una misma estructura. d) Pliegues y *pop-up* en el enlosado regular de la plaza del Foro. e) Fragmento de la muralla occidental basculada. d) Dovelas hundidas y desplazadas en una ventana adintelada en uno de los edificios públicos del Foro.



**Figura 11.** Resultados conjuntos para algunos de los tipos de estructuras analizadas: flechas negras, orientación de los datos, y flechas rojas, orientación de máximo acortamiento horizontal (*ey*) deducida para cada estructura. Nótese que la orientación de los datos no tiene por qué ser paralela o del mismo sentido que la orientación de *ey* deducida de su análisis. La relación angular entre la orientación de los datos y la orientación de *ey* deducida de su análisis depende de la interpretación cinemática teórica de cada una de las estructuras.

**Figura 12.** Análisis conjunto de los resultados obtenidos del estudio individual de los EAE que aparecen en el yacimiento de la ciudad romana de *Baelo Claudia* (Cádiz). a) Representación de las orientaciones de máximo acortamiento horizontal (*ey*) deducidas del análisis individual de EAE. b) Resultado común de la orientación de *ey* para todo el yacimiento. c) Representación de las trayectorias de deformación (*ey* líneas rojas; *ex* líneas azules) en la zona del Foro de la ciudad. Estos resultados presentan una homogeneidad clara que corrobora que las trayectorias presentan reorientaciones en: la zona del *decumanus maximus* (D), producida por la existencia de drenajes subterráneos; la zona de la plaza del Foro (B), producidas por la existencia de un enlosado regular; y la zona del templo de Ísis (A), relacionada con un proceso gravitacional cósmico muy superficial que afecta a esa parte del yacimiento (Silva *et al.*, 2009).



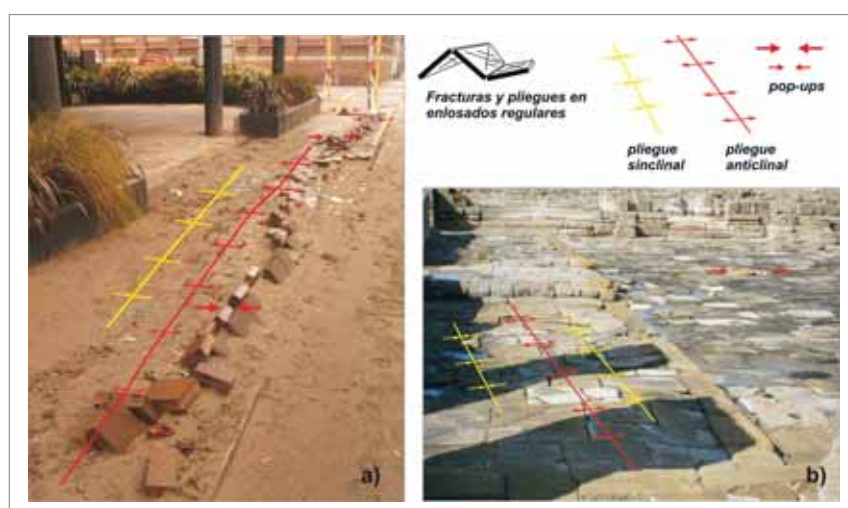
Finalmente, se realiza un análisis conjunto de todas las orientaciones de *ey* en el yacimiento. Este análisis permitió, una vez descartados otros procesos, establecer el origen sísmico de las deformaciones. Además, los resultados son coherentes con los resultados obtenidos por otros autores (Silva *et al.*, 2005 y 2009). Este tipo de análisis también nos permite definir zonas en las que se producen reorientaciones de las trayectorias de deformación como consecuencia de la presencia de estructuras como canalizaciones, cimientos, etc.

### Análisis de sismos instrumentales

La mayor parte de las estructuras y efectos considerados en esta clasificación han sido descritos en diferentes yacimientos arqueológicos como resultado de los daños producidos por efecto de un terremoto. No obstante, muchos de esos efectos pueden observarse en edificios históricos afectados por sismos instrumentales (Fig. 13).



Iglesia de San Juan (izquierda) y ruinas del convento de las Clarisas, en Lorca. Ambos edificios registraron diferentes daños a causa del terremoto.



**Figura 13.** Comparación de los daños sufridos por actividad sísmica en: (a) pavimento de bloques en una acera de Armagh Street (Christchurch, Nueva Zelanda) (sismo del 22 de febrero de 2011) (Foto: Juan Miguel Insúa Arévalo); b) enlosado del Foro del yacimiento romano de Baelo Claudia (Cádiz), ciudad afectada por un sismo en el siglo III (Silva et al., 2009). En ambos casos se observa cómo se produce el plegamiento del pavimento formando pliegues anticlinales y sinclinales, así como la formación de estructuras en *pop-up*. En el caso de la estructura del terremoto de Christchurch esta deformación también está asociada a procesos de licuefacción de las arenas subyacentes.

El análisis de daños producidos por terremotos instrumentales como el de Lorca (Murcia), ocurrido el 11 de mayo de 2011, puede ser la clave para la interpretación de daños sísmicos en yacimientos arqueológicos (Figs. 14 y 16). Los análisis preliminares de los efectos de este terremoto nos permiten calibrar la metodología desarrollada, estableciendo los márgenes de error en el cálculo de los parámetros de deformación.

En el caso del terremoto de Lorca se han seleccionado dos edificios históri-

cos de la ciudad: la iglesia de San Juan (Figs. 14 y 15) y el convento de las Clarisas (Figs. 16 y 17).

En la iglesia de San Juan (siglo XV) se observan diferentes daños en las ventanas de la torre, con graduaciones distintas en función de la orientación de las mismas

(Fig. 14). Las ventanas orientadas según N 170° E presentan mayores daños por colapso del arco (ver Fig. 5) que las situadas en orientaciones perpendiculares (Fig. 15), lo que indicaría una orientación preferente del tensor de deformación que ha causado los daños (orientación de  $\epsilon_y$ ).

En el caso del convento de las Clarisas, bastante dañado por el terremoto (Fig. 16), los análisis muestran una homogeneidad en la orientación de  $\epsilon_y$  según NO-SE (Fig. 17), coincidente con los resultados obtenidos en más de 80 puntos de análisis en toda la ciudad.

## Conclusiones

El análisis arqueosismológico de yacimientos y edificios históricos puede aportar información indispensable para el cálculo de la peligrosidad sísmica.

El análisis de la deformación observable en los diferentes efectos inventariados en el sitio, aplicando metodologías clásicas de análisis estructural geológico, permite cuantificar la deformación presente en el yacimiento.

Los resultados del análisis arqueosismológico de la deformación relacionada con los frentes de propagación de on-

**El análisis de daños en terremotos instrumentales, como el de Lorca (Murcia) del 11 de mayo de 2011, puede ser la clave para la interpretación de daños sísmicos en yacimientos arqueológicos**

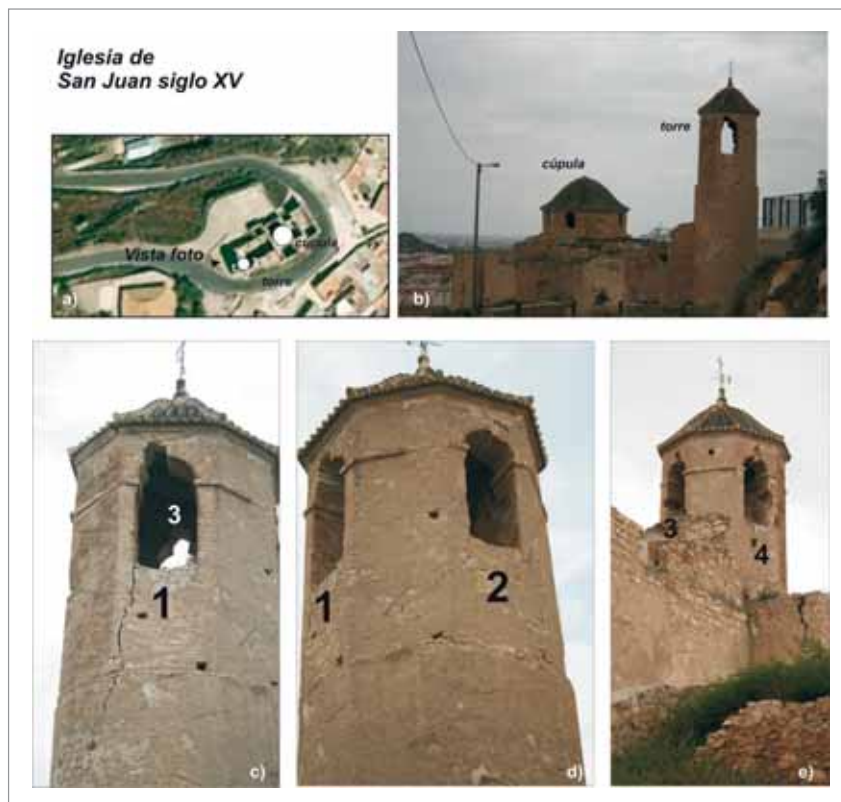


Figura 14. Daños en la torre de la iglesia de San Juan (siglo XV), en Lorca (Murcia).

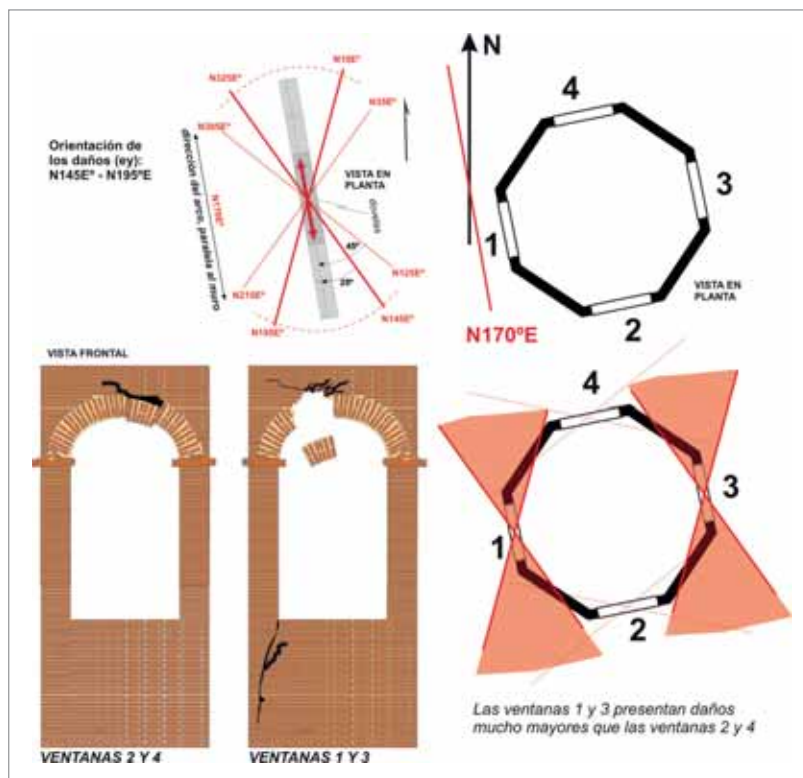
Los resultados del análisis arqueosismológico de la deformación permiten evaluar la coherencia de las deformaciones con respecto a las probables fuentes sísmogenéticas, ya sean fallas activas conocidas o desconocidas

terremotos arqueológicos permita reducir el grado de incertidumbre del análisis, e incluso considerar parámetros como localización epicentral e intensidad máxima. Estos parámetros pueden ser utilizados en el cálculo de la peligrosidad sísmica implementando los resultados en escalas macrosísmicas que se basen en los efectos geológicos y ambientales de los terremotos, como es el caso de la escala macrosísmica ESI-07 (*Environmental Seismic Intensity*–2007; Michetti *et al.*, 2007).

das sísmicas superficiales permite evaluar la coherencia de las deformaciones con respecto a las probables fuentes sísmogenéticas, ya sean fallas activas conocidas o desconocidas.

El análisis de los efectos de terremotos recientes registrados instrumentalmente en enclaves históricos o yacimientos arqueológicos aporta gran cantidad de información sobre la cinemática de los procesos. Al conocer con la instrumentación los parámetros focales del sismo, es posible calibrar los EAE, de forma que su aplicación inversa a la paleosismología y a los

Figura 15. Análisis de los daños observados en la torre de la iglesia de San Juan. Los laterales de la torre orientados según N 170° E presentan daños más importantes que los existentes en otras orientaciones. La determinación de estas orientaciones nos permite cuantificar la deformación producida por el sismo.





**Figura 16.** Daños en el monasterio de Santa Ana y la Magdalena de las Clarisas, en Lorca (Murcia). a) Vista aérea de los edificios que conforman el monasterio y situación de los daños principales. (b) y (h) Fracturas conjugadas en aspas en estructuras murarias de diferentes edificios del complejo religioso; c) Fractura y desplazamiento del muro NO en un edificio anexo a la iglesia; muros colapsados orientados en diferentes estructuras: (d) en un pequeño campanario; (e) en el muro NO de la iglesia del convento; (g) en un edificio anexo a la iglesia, y en una de las esquinas de la fachada principal (g).

El análisis arqueosismológico presenta otro tipo de connotación importante a la hora de prevenir el riesgo sísmico en zonas con periodos de retorno elevados como es el caso de la península Ibérica. En estas zonas lentas, los periodos de retorno de grandes terremotos hacen que la sociedad no sea

consciente de la peligrosidad sísmica de la zona en la que reside. Ese lapso de tiempo tan elevado reduce la percepción del peligro por parte de la población y limita la preparación de la sociedad frente a este tipo de eventos.

En nuestra opinión, la identificación, inventario y análisis de efectos de terremotos y EAE en el patrimonio histórico y arqueológico puede concienciar a la población de la peligrosidad sísmica existente en determinadas zonas de la península Ibérica, así como su grado de exposición a terremotos destructivos.

Esta información sobre el peligro sísmico percibido por la población es de gran ayuda tanto para mitigar posibles daños como para establecer planes de emergencia por parte de la Administración pública.

Actualmente aún son visibles los efectos de terremotos destructivos, como el de Lisboa de 1775, en muchos monumentos y yacimientos arqueológicos del territorio español. Con frecuencia, las actuaciones de restauración sobre el pa-



**Figura 17.** Resultados del análisis de los daños en el monasterio de las Clarisas. La caracterización de la cinemática y de la orientación de los daños nos permite sistematizar la toma de datos y su representación para su posterior análisis. En el caso de este edificio histórico, los resultados muestran que los daños presentan una clara orientación según N140°E, incluso el sentido de los colapsos en muros de diferentes edificios del convento es homogéneo según 320°, orientación que se repite en la práctica totalidad de los edificios históricos afectados por este sismo.

En muchos casos, las actuaciones de restauración sobre el patrimonio arquitectónico eliminan por completo estos efectos sísmicos que creemos tan relevantes y pedagógicos, y que forman parte de nuestro patrimonio cultural

trimonio arquitectónico eliminan por completo estos efectos sísmicos que consideramos tan relevantes y pedagógicos y, por qué no decirlo, que forman parte de nuestro patrimonio cultural. ♦

### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se ha desarrollado con una Ayuda a la Investigación de FUNDACIÓN MAPFRE.



### PARA SABER MÁS

- [1] Rapp, G. Earthquakes in the troad. In: Troy: The archaeological Geology (G. Rapp y J.A. Gifford, Eds.). 1982. Princeton. 43-58.
- [2] Stiros, S. Earthquake effects on ancient constructions. In: New Aspect of Archaeological Science in Greece (R.E. Jones y H.W. Catling, Eds.). British Schools at Athens, Fitch Occasional Paper. 1988a; 3, 1-6.
- [3] Stiros, S. Archaeology, a tool to study active tectonics – The Aegean as a case study. Eos, Trans. Am.Geophys. Union. 1988b;13, 1636-1639.
- [4] Stiros, S y Jones, R.E. Archaeoseismology. Institute of Geology and Mineral Exploration. 1996. Fitch Laboratory Occasional Paper. Stiros S. y Jones, R.E., Eds. Atenas. 268 p.
- [5] Nikonov, A. On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments. 1988. In: Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites (G. Marinov y G. Koukis, eds.). Balkema, Rotterdam. 1325-1320.
- [6] Guidoboni, E. I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea: storia, archaeologia, sismologia Bologna. 1989. GA-Istituto Nazionale di Geofisica.
- [7] Rodríguez-Pascua, MA; Pérez-López, R; Giner-Robles, JL; Silva, PG; Garduño-Monroy, VH y Reicherter, K. (2009a). A comprehensive classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) for structural strain analysis in Archaeoseismology. In: R. Pérez-López, C. Grützner, J. Lario, K. Reicherter y P.G. Silva (eds.). Archaeoseismology and Palaeoseismology in the Alpine-Himalayan Collisional Zone. 2009. Abstracts Volume of the 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 110. Baelo Claudia, Spain.
- [8] Rodríguez-Pascua, MA; Pérez-López, R; Giner-Robles, JL; Silva, PG; Garduño-Monroy, VH y Reicherter, K. A Comprehensive Classification of Earthquake Archaeological Effects (EAE) in Archaeoseismology: application to ancient remains of Roman and Mesoamerican cultures. Quaternary International. In press. QUATINT-D-10-00171R2. 2011.
- [9] Giner-Robles, JL; Rodríguez-Pascua, MA; Pérez-López, R; Silva, PG; Bardají, T; Grützner, C y Reicherter, K (editores). Structural analysis of Earthquake Archaeological Effects (EAE): Baelo Claudia Examples (Cádiz, South Spain), 2009. 1st INQUA-IGCP 567 International Workshop on Earthquake Archaeology and Palaeoseismology, 7th-13th September, p. 47. Baelo Claudia, Spain.
- [10] Giner-Robles, JL; Pérez-López, R; Silva, PG; Rodríguez-Pascua, MA; Bardají, T; Lario, J y Garduño-Monroy, VH. Evaluación del daño sísmico en edificios históricos y yacimientos arqueológicos. Aplicación al estudio del riesgo sísmico. Proyecto EDASI. Fundación MAPFRE (en prensa).
- [11] Martínez Solares, JM. Los efectos en España del terremoto de Lisboa. Monografía nº 19, 2001. Dirección General del Instituto Geográfico Nacional, Madrid, (19) 756 pp.
- [12] Martínez Vázquez, F. El terremoto de Lisboa y la catedral de Coria (vicisitudes del Cabildo), 1999, 1755-1759. Ed. Ayto. Coria. 189 pp.
- [13] Sillières, S. Baelo Claudia: Una ciudad romana de la Bética. 1997. Junta de Andalucía- Casa de Velázquez, Madrid.
- [14] Silva, PG; Borja, F; Zazo, C; Goy, JL; Bardají, T; De Luque, L; Lario J y Dabrio, C. Archaeoseismic record at the ancient Roman city of Baelo Claudia (Cádiz, South Spain). Tectonophysics. 2005; 408 (1-4): 129-146.
- [15] Silva, PG; Reicherter, K; Grützner, Ch; Bardají, T; Lario, J; Goy, JL; Zazo, C y Becker-Heidmann, P. Surface and subsurface palaeoseismic records at the ancient Roman city of Baelo Claudia and the Bolognia Bay area, Cádiz (South Spain). Geological Society of London, Special Publication. 2009; 316: 93-121.
- [16] Michetti, AM; Audemard, F; Azuma, T; Clague, J; Commerci, V; Esposito E; Guerrieri, A; Gürpınar, A; McCalpin, J; Mohammadioun, B; Morner, NA; Ota, Y; Porfido, S; Roghazin, E; Serva, L; Tatevosian, R y Vittori, E. Intensity Scale ESI-2007. Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia, 2007, 74. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.