

Análisis estructural de daños orientados en el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. Aplicaciones en arqueosismología

J. L. Giner-Robles⁽¹⁾, R. Pérez-López⁽²⁾, P. Silva Barroso⁽³⁾, M. Á. Rodríguez-Pascua⁽²⁾, F. Martín-González⁽⁴⁾
y L. Cabañas⁽⁵⁾

(1) Dpto. Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. Campus de Cantoblanco, s/n. 28049 Madrid.
jorge.giner@uam.es

(2) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. España.
ma.rodriguez@igme.es, r.perez@igme.es

(3) Dpto. Geología. Escuela Politécnica Superior de Ávila. Universidad Salamanca. 05003-Ávila. España.
pgsilva@usal.es

(4) Área de Geología. ESCET. Universidad Rey Juan Carlos. C/Tulipán, s/n. Móstoles, 28933 Madrid. España.
fidel.martin@urjc.es

(5) Instituto Geográfico Nacional. C/ General Ibáñez de Ibero, 3, 28003 Madrid. España.
lcabanias@fomento.es

RESUMEN

El estudio de la direccionalidad de los daños en terremotos instrumentales permite calibrar y mejorar las metodologías de análisis arqueosismológico. Estas metodologías se basan en el análisis de las direcciones predominantes de daños en un yacimiento arqueológico o en un edificio histórico de forma que nos permita analizar el posible origen sísmico de las deformaciones observadas. El análisis de la orientación de los daños del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 nos ha permitido calibrar estas metodologías. Los resultados de este análisis muestran una clara homogeneidad en las direcciones de máxima deformación deducidas de la interpretación de las estructuras, con una orientación media NO-SE. Esta orientación es prácticamente perpendicular a la orientación de la falla y además coincide con las orientaciones de los vectores de desplazamiento en la horizontal deducidos del acelerograma de la estación de registro sísmico del Instituto Geográfico Nacional (IGN) situada en el centro de la ciudad de Lorca. Las trayectorias de máxima deformación construidas muestran que la presencia de diferentes estructuras tectónicas puede inducir variaciones en las orientaciones de los daños.

Palabras clave: análisis estructural geológico, arqueosismología, direccionalidad de daños, efectos arqueológicos de terremotos (EAEs), terremoto de Lorca

Structural analysis of seismically oriented damage caused by the Lorca earthquake of 11 May 2011: Application to archaeoseismology

ABSTRACT

A study of the orientation of the damage occurring in instrumental earthquakes allows us to calibrate and improve archaeoseismic analytical methods. These methods are based on an analysis of the predominant trends of damage occurring to an archaeological site or historic building in such a way as to allow us to analyse the possible seismic origin of the deformations in question. An analysis of the orientation of the damage caused by the earthquake at Lorca on 11 May 2011 has led to our being able to calibrate these methods. The results of the analysis of the structures show a clearly homogeneous NW-SE trend of maximum deformation. This orientation is almost perpendicular to the orientation of the fault and also coincides with the orientation of the horizontal displacement vectors, as deduced from the accelerograph of the National Geographic Institute seismic station sited at the city centre in Lorca. The trends of maximum deformation reveal that the presence of different tectonic structures may lead to variations in damage orientation.

Key words: archaeoseismology, damage orientation, earthquake archaeological effects (EAEs), Lorca earthquake, structural geological analysis

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

A study of the orientation of the damage occurring in instrumental earthquakes allows us to calibrate and improve archaeoseismic analytical methods. These methods are based on an analysis of the predominant directions of damage occurring in an archaeological site or historic building in such a way as to allow us to analyse the possible seismic origin of the deformations in question.

The main difficulties in this kind of study are firstly to calibrate the analysis methods and then to establish a relationship between the damage orientation and seismic focal parameters (e.g. orientation and type of fault). This is why it is of interest to analyse the damage caused by earthquakes recorded during the instrumental period, to the archaeological and architectural heritage. An analysis of the damage caused by this type of earthquake allows us to test and calibrate the methods used in earthquake studies registered in the archaeological heritage. We describe here the results of our analysis of the oriented damage done during the Lorca earthquake of 11 May 2011.

Earthquake analysis methods in archaeological sites (Giner-Robles et al., 2009, 2011) are multidisciplinary in character as they require the input of various specialists. Such an analysis has several phases: identification of effects and their inventory (earthquake archaeological effects, EAEs) (Rodríguez Pascua et al., 2011), the dating of the damage, quantification of the strain present in the observed structures and an analysis of the historic and archaeological documentation of the archaeological site (Fig. 1).

In the case of an instrumental earthquake such as the one at Lorca ($M_w=5.1$) the dating and documentation analysis is not essential; all that really needs to be done is to quantify the strain focused principally on the co-seismic effects on the fabric of buildings and other constructions (Fig. 1). To quantify deformation correctly several phases must be followed: damage classification and registration, individual structure analysis, joint data analysis, maximum-shortening-trajectory calculations and zoning of the city, so as finally to establish a connection between damage orientation and the seismic parameters (e.g. fault orientation).

Results and discussion

To register the damage caused within the city of Lorca we used the classification of earthquake archaeological effects (EAEs) proposed by Rodríguez Pascua et al. (2011). Altogether, we listed more than 140 structures for study, most of them located in Lorca city centre (Fig. 3).

The second phase of the analysis consisted of determining the maximum strain observed in each of the individual structures (Fig. 2), putting into practice the method proposed by Giner-Robles et al. (2011). The analysis of one of these structures, the tower of the church of San Juan, close to the castle, is set out in Figure 2. The results of a joint analysis of the data collected from the entire city (Figs 3 and 4) agree on a NW-SE direction of maximum strain, which is perpendicular to the trend of the fault that caused the earthquake. In some EAEs, such as collapsed walls, chimneys, impact marks and so on, the results not only reveal the direction but also define the azimuth of the damage (Fig. 4b).

The overall results obtained from the analysis, according to the type of effect registered (Fig. 5), show homogeneous orientations with very little dispersion, with a mean direction of maximum strain sub-parallel to the mean orientation obtained for the whole city, which shows that the average orientation for the whole city is of the inventory-effect type. The inventory-effect type is defined by the orientation of the streets, for instance.

From the specific strain data it is possible to interpolate the trajectories by outlining the variations in the maximum-strain orientations. In Lorca city centre the maximum horizontal shortening trajectories trend NNW-SSE whereas in the surrounding areas they trend NE-SW or even WNW-ESE. These variations in orientation give a clear sigmoid-shape to the graph of the trajectories. These changes in the trend of the trajectories do not seem to be interrelated either with the orientation of the major streets and avenues of the city (Fig. 4) or with the distance to the epicentre (nor even with its azimuth as far as the affected structures are concerned). The orientations of the trajectories are determined by the major faults present in the geological map: strike-slip faults with a NE-trending reverse component and N-S normal faults (Fig. 6). From the maximum-shortening trajectories and the different faults mapped, five zones in the city can be defined (Fig. 7).

The most obvious change in the orientation of maximum shortening trajectories is located at the boundary between zones A and B in the south-east of the city. In zone A the orientations of the trajectories trend more northward than those in zone B even though the principal difference is in the orientation of the deformation azimuth (Fig. 8).

The event was registered by an accelerograph in the city of Lorca itself belonging to the IGN (Instituto Geográfico Nacional). The 2D ground motion can be obtained from a study of the accelerogram, which allows us to define the main orientations of the displacement vectors at the site of the accelerograph. These vector orientations (Fig. 9a) appear more towards the north than the deformation directions obtained from the overall effects registered in the city (Fig. 4a). Nevertheless, if we compare them with the deformation

directions obtained from a study of the subzone where the accelerograph station is sited (subzone a2), it can be seen that the orientation of the displacement vectors runs parallel to that of the deformations found in that area (Fig. 9b). This angular relationship proves that the maximum-deformation orientations obtained from an analysis of the EAEs are comparable with those obtained from seismic registers at the instrumental stations.

*The focal mechanism of the Lorca earthquake, as calculated by the IGN, defines a left-lateral reverse fault with nodal planes trending N127°E 59°SE and N040°E 69NW. The nodal planes of the focal mechanism construction make a perfect angular fitting with the strain orientations obtained from the analysis of overall effects: one perpendicular and the other parallel (Fig. 10). The nodal plane that fits best with geological mapping (see Fig. 6), however, is that oriented N040°E, that is to say, the plane perpendicular to the average orientation of the damage observed in the city of Lorca (N130°E). Moreover, this orientation is normal to the direction of the seismic-wave propagation (N220°) obtained by López-Comino *et al.* (2012).*

Conclusions

Near-field instrumental earthquakes can be analysed from the orientation of the damage caused. We have obtained similar results to those of the accelerogram with regard to the fault plane orientation and rupture direction (Fig. 10). The changes in orientation of the maximum-shortening trajectories show that directivity could depend upon the presence of active tectonic structures rather than the orientation and type of fault that causes the earthquake alone.

The use of this method allows us to corroborate its validity when studying archaeological and historical buildings, and present it is a very useful instrument for making use of knowledge about the historical seismicity of a zone. In short, this type of analysis offers new research lines that could be applied to seismic-hazard analysis and to the preservation of our historical heritage.

Introducción

La arqueosismología permite inventariar y analizar los daños presentes en un yacimiento arqueológico o edificio histórico, de forma que se pueda cuantificar las deformaciones presentes y establecer su posible origen sísmico (Nikonov, 1988; Guidoboni, 1989; Stiros y Jones, 1996). Los principales problemas de un estudio de este tipo son: 1) calibrar las metodologías de análisis, y 2) establecer relaciones entre la orientación de los daños (direccionalidad) con los parámetros focales del sismo (orientación y tipo de falla). Por estas razones, es de especial interés analizar los daños en el patrimonio arqueológico y arquitectónico producidos por terremotos instrumentales. Entonces el análisis de eventos instrumentales permite poner a prueba y calibrar las metodologías que se aplican en los estudios de terremotos registrados en el patrimonio arqueológico.

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos del análisis de las orientaciones de los daños del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 (Mw 5,1). Este sismo se sitúa en la zona de Falla de Alhama de Murcia, una de las de mayor longitud de la zona de cizalla de las Béticas Orientales (Silva *et al.*, 1993); cuya cinemática corresponde a un desgarre sinistral con componente inversa (Martínez-Díaz *et al.*, 2002).

El objetivo principal de este estudio es establecer cuantitativamente la orientación de la deformación sísmica producida por el terremoto de Lorca, aplicando metodologías de análisis arqueosismológico,

y estableciendo posibles relaciones con algunos parámetros del sismo. En el transcurso del análisis se pretende establecer la bondad y coherencia de la metodología para su aplicación en yacimientos arqueológicos y edificios históricos.

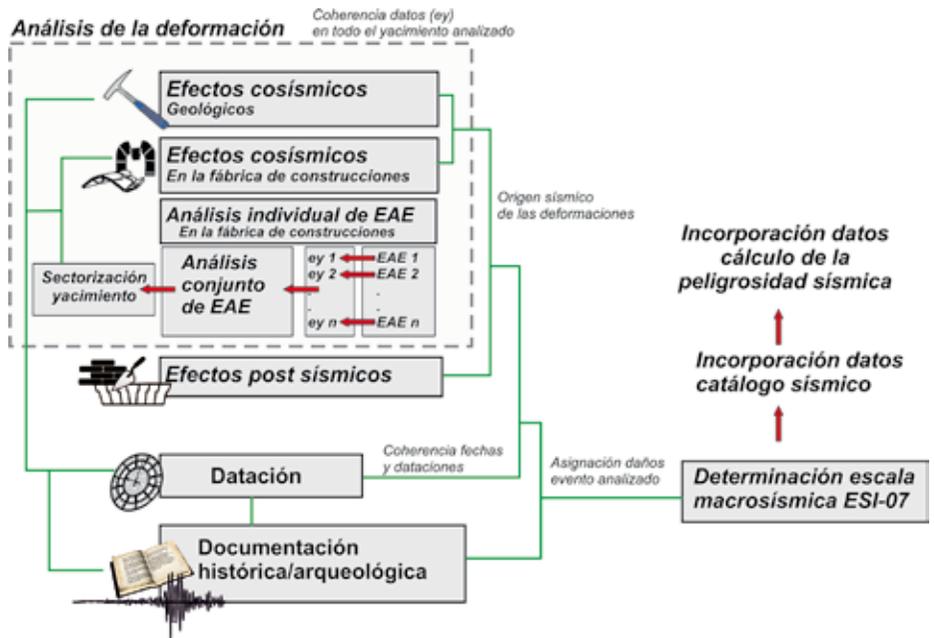
Metodología

La metodología utilizada en este análisis se basa los análisis propuestos por Giner-Robles *et al.* (2009, 2011) para su aplicación en estudios arqueosismológicos (figura 1). Esta metodología se basa en la cuantificación de las deformaciones presentes en yacimientos arqueológicos y edificios históricos susceptibles de haber sido producidas por eventos sísmicos. En este análisis se establecen las orientaciones de la deformación máxima observada en cada una de las estructuras analizadas. La homogeneidad de los resultados obtenidos permite discutir la presencia de un evento deformacional común a todas las estructuras.

En un terremoto instrumental el análisis se simplifica, ya que únicamente se cuantifica la deformación sin necesidad de establecer la cronología de las deformaciones. Para este análisis hemos utilizado la metodología propuesta por Giner-Robles *et al.* (2011) (figura 1), que consta de 2 fases: (1) inventario e identificación de daños, y (2) análisis de las orientaciones de deformación: análisis individual, análisis en conjunto, análisis por EAE's, cálculo de trayectorias de deformación y análisis por zonas.

Figura 1. 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) (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011), y la posible determinación de escalas macrosísmicas (ESI-07) (Michetti *et al.*, 2007), para la incorporación del evento a catálogos sísmicos y al cálculo de la peligrosidad en la zona considerada. En el caso de un sismo instrumental se aplica únicamente el análisis de la deformación a partir de los efectos cosísmicos del terremoto.

Figure 1. Method for quantifying the study of a site/city on the basis of earthquake archaeological effects (EAE), with the inclusion of possible primary and secondary geological effects (Rodríguez-Pascua *et al.*, 2011, 2012) and determination of macroseismic scales (ESI-07) (Michetti *et al.*, 2007), with the aim of incorporating the event into seismic catalogues and calculating the potential hazard in the area concerned. In the case of an instrumental seismic event only an analysis of deformation from the co-seismic effects of the earthquake is required.



Inventario e interpretación de los daños

Para el inventario e identificación de los diferentes efectos producidos por el terremoto del 11 de mayo de 2011 en la ciudad de Lorca se ha utilizado la clasificación propuesta por Rodríguez-Pascua *et al.* (2011, 2012); inventariándose un total de 182 efectos (figura 2). La mayor parte de ellos son colapsos, basculamientos o formación de fracturas conjugadas en muros, y caídas orientadas de diferentes estructuras (balaustradas, chimeneas, etc.).

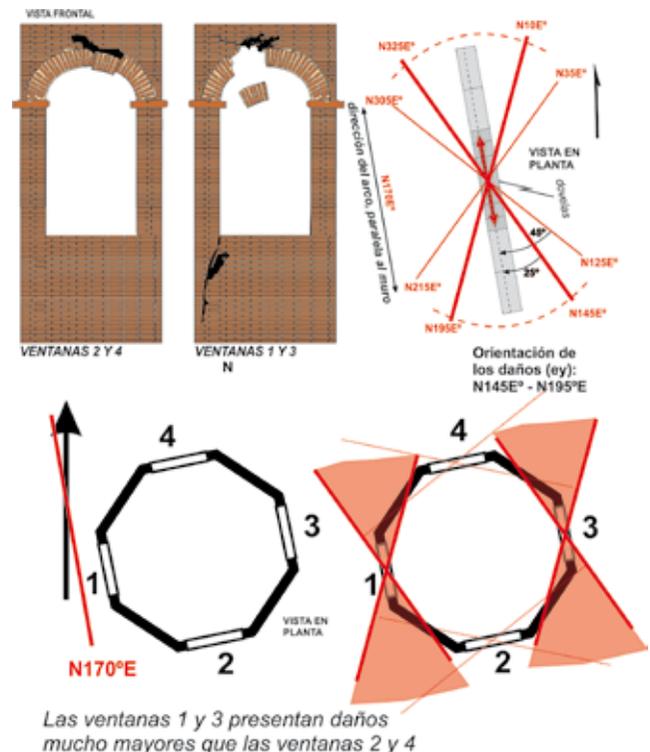
los efectos inventariados en la ciudad, y en algunos casos también el acimut de esa deformación máxima. La metodología aplicada permite establecer a partir de los mecanismos de deformación en cada una de las estructuras, una orientación de la deformación máxima inducida por el movimiento del terreno (figura 3), y en algunos casos el acimut de esa deformación máxima, deducida de los vectores de caída

Análisis de orientaciones de deformación

Se han obtenido datos individuales de orientación de máxima deformación de más del 95% (176 datos) de

Figura 2. Ejemplo del análisis y cuantificación de la deformación en los daños producidos en la torre de la iglesia de San Juan en la ciudad de Lorca. En la torre de planta octogonal de esta iglesia se observa el hundimiento de la zona central del arco en las ventanas opuestas orientadas N170°E (ventanas 1 y 3) (a,c); en las ventanas orientadas N80°E (ventanas 2 y 4) no se produce el colapso. A partir de la metodología desarrollada por Giner-Robles *et al.* (2009, 2011) (b) se puede obtener un intervalo de direcciones de máxima deformación (área roja) (c).

Figure 2. Sample analysis and quantification of the deformation caused by the damage to the tower of the church of San Juan in the city of Lorca. It can be seen in this octagonal tower that the centre of the arch over the opposite, N170°E facing windows (windows 1 and 3) (a, c) has collapsed, whilst no such collapse occurred over the N80°E facing (windows 2 and 4). A maximum directional range for the deformations (red area) (c) can be obtained via the method developed by Giner-Robles *et al.* (2009, 2011) (b).



Las ventanas 1 y 3 presentan daños mucho mayores que las ventanas 2 y 4

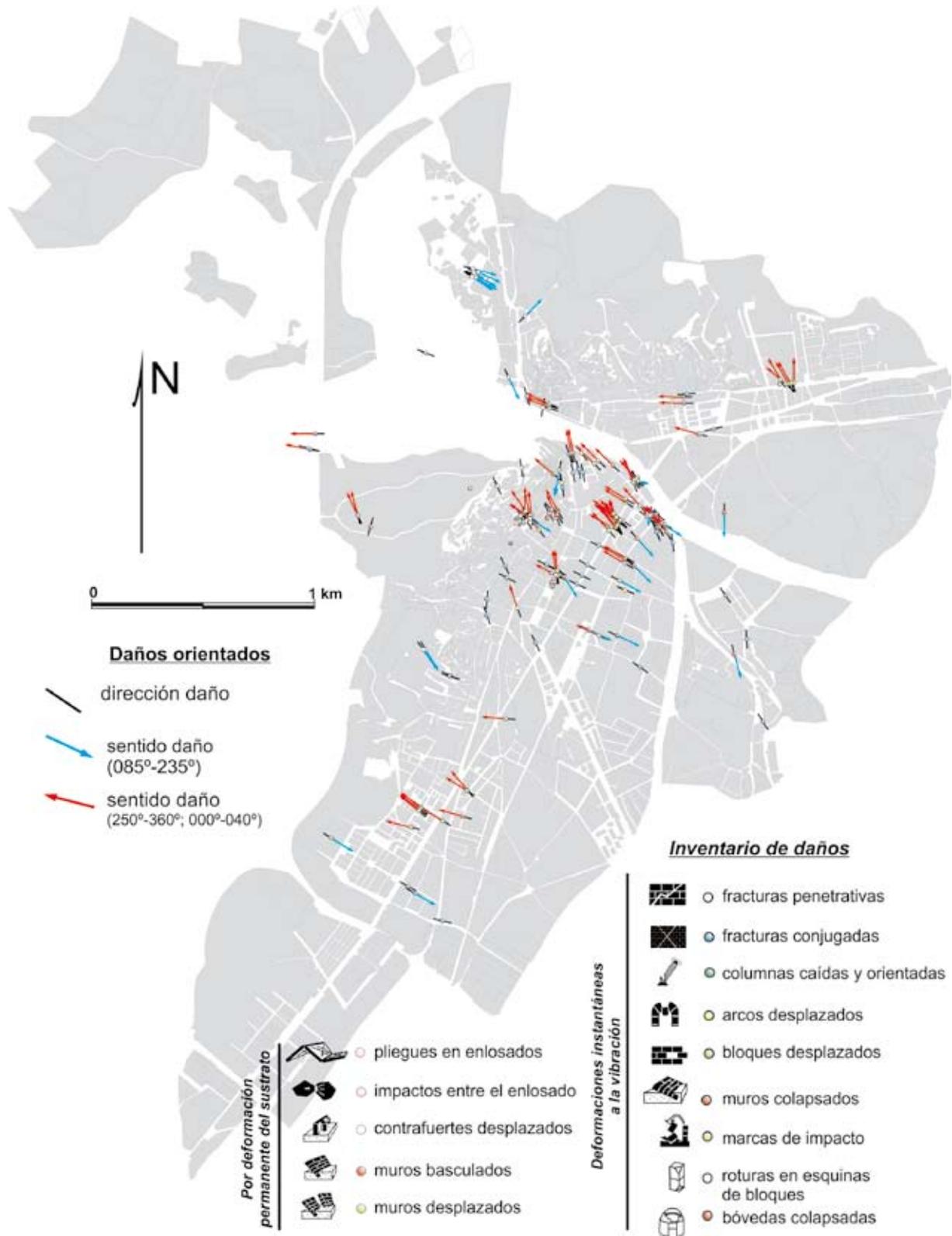


Figura 3. Mapa de localización de los efectos inventariados (esferas), donde los colores definen el tipo de EAE. Se representan también las direcciones de deformación deducidas de cada uno de los efectos, así como el acimut de la deformación en los efectos en los que es posible calcular este dato.

Figure 3. Map of the registered effects (spheres) in which the colors define the type of EAE. The strain directions deduced from each EAE, as well as the azimuth of deformation in the effects whenever this is possible to calculate is also shown.

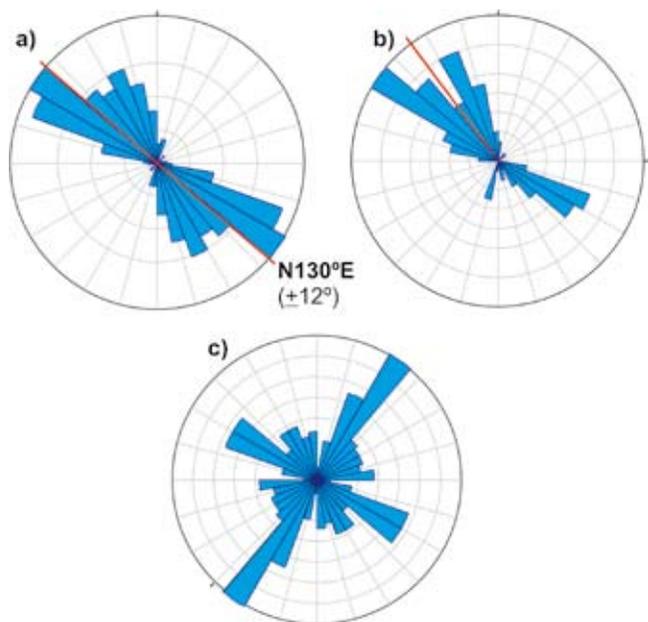


Figura 4. Diagramas de rosas de orientaciones de máxima deformación obtenidos del análisis de todos los efectos inventariados en la ciudad de Lorca y sus alrededores: a) orientación de máxima deformación, b) sentido de máxima deformación, c) orientación de las estructuras que presentan los daños.

Figure 4. Rose diagrams of the orientations of maximum deformation obtained from an analysis of all the effects registered in the city of Lorca and surrounding areas: a) orientation of maximum deformation; b) azimuth of maximum deformation; and c) orientation of the damaged structures.

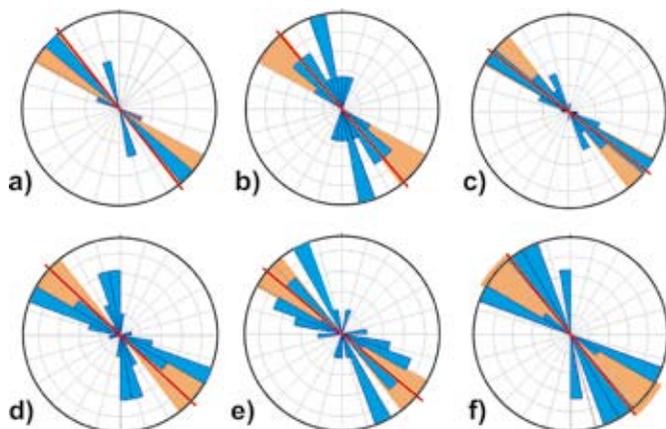


Figura 5. Rosas de orientaciones de la deformación máxima deducida en función del tipo de efecto. Se representa la orientación media (línea roja) y el intervalo de dispersión en la orientación de máxima deformación obtenida del análisis del total de los datos ($N130^{\circ}E \pm 12^{\circ}$) (figura 4a). a) muros basculados, b) marcas de impacto por caída, c) caídas orientadas (chimeneas, balaustradas,...), d) muros colapsados, e) fracturas conjugadas, f) dovelas de arco desplazadas.

Figure 5. Rose diagram of maximum deformation deduced on the basis of the type of effect, showing the average orientation (red line) and the range of dispersion in the direction of maximum deformation ($N130^{\circ}E \pm 12^{\circ}$) obtained from an analysis of all the relevant data (Fig. 4A): a) tilted walls; b) impact marks caused by collapse; c) orientation of falls of chimneys, balustrades etc.; d) collapsed walls; e) conjugate fractures; and f) displaced arch blocks.

de estructuras como colapsos, caídas orientadas, o marcas de impacto en el pavimento. Es importante señalar que el acimut de la deformación presenta la misma dirección y sentido opuesto a la llegada del primer impulso sísmico (*seismic shock direction*) (Giner-Robles *et al.*, 2011).

El análisis conjunto de los datos (figura 4a) muestra una orientación de la deformación en la dirección $N130^{\circ}E$. De algunos de los datos se puede deducir el acimut de la deformación (vectores de caídas orientadas, de marcas de impacto, de colapso de muros, etc.) En la ciudad de Lorca los acimuts muestran dos sentidos predominantes: el principal hacia los 320° , y otro secundario hacia los 120° (figura 4b). En cuanto a la orientación de las estructuras dañadas de las que se han deducido los daños presenta una gran dispersión con un máximo en $N35^{\circ}E$ y otro en $N125^{\circ}E$ (figura 4c).

Posteriormente se ha procedido al análisis de los resultados en función del tipo de efecto inventariado, para así establecer la homogeneidad de los resultados en toda la ciudad, y determinar la independencia de los resultados con respecto al tipo de efecto. En la figura 5, se muestran los resultados de los EAEs más representativos. La totalidad de los resultados obtenidos del análisis en función del tipo de efecto (figura 5) muestran orientaciones homogéneas con muy poca dispersión. En todos los casos, la dirección media de máxima deformación está comprendida en el intervalo de desviación de la orientación media obtenida para el conjunto de la ciudad ($N128^{\circ}E$ - $N142^{\circ}E$). Estos resultados muestran que la orientación media obtenida para el conjunto de la ciudad es independiente del tipo de efecto inventariado.

Construcción de trayectorias de deformación

A partir de los datos puntuales de deformación podemos interpolar sus trayectorias, definiendo las variaciones espaciales de las orientaciones de máxima deformación en el área analizada. Las trayectorias de deformación máxima en la zona metropolitana de Lorca dibujan un sigmoide (figura 6): en la zona central, aproximadamente en la zona del casco viejo, las trayectorias se disponen NNO-SSE, mientras que en el resto parecen situarse NE-SO, e incluso en algunas zonas hacia ONO-ESE.

En principio estos cambios en la dirección de las trayectorias, no parece tener relación con la orientación de las principales calles y avenidas de la ciudad (figura 4c), ni con respecto a la distancia al epicentro, ni al acimut del mismo con respecto a las estructuras afectadas.



Figura 6. Trayectorias de máxima deformación construidas a partir de la interpolación de los resultados puntuales de máxima deformación deducidos del análisis individual de las estructuras (EAE's). Se representan también las principales estructuras tectónicas presentes en la cartografía geológica a escala 1:25.000.

Figure 6. Trajectories of maximum deformation arrived at by interpolating the point-of-maximum-deformation results deduced from an individual analysis of the EAEs. The main tectonic structures appearing on the 1:25,000 scale map are also shown.

Sectorización de la ciudad y análisis por zonas

La cartografía geológica y geomorfológica de la zona a escala 1:25.000 muestra que la ciudad de Lorca se sitúa fundamentalmente en materiales cuaternarios (principalmente terrazas fluviales y abanicos aluviales). La distribución de las diferentes litologías en superficie no parece ser el factor condicionante en las variaciones de orientación de las trayectorias de máxima deformación. Los cambios en las orientaciones de las trayectorias parecen estar condicionados por las principales fallas cartografiadas en la zona. Las

fallas principales que parecen controlar esos cambios de orientación son: las fallas de desgarre con componente inversa orientadas NE-SO y fallas de carácter normal-direccional orientadas N-S.

A partir de las diferentes fallas cartografiadas, se han delimitado 5 zonas bien diferenciadas por la orientación de las trayectorias de máxima deformación (A, B, C, D, E), que a su vez están agrupadas en función del sentido de deformación (NO, SE) (figura 7):

- Zonas con sentido de la deformación hacia el NO: zona A caracterizada por orientaciones de la deformación máxima variables desde NNO-SSE a

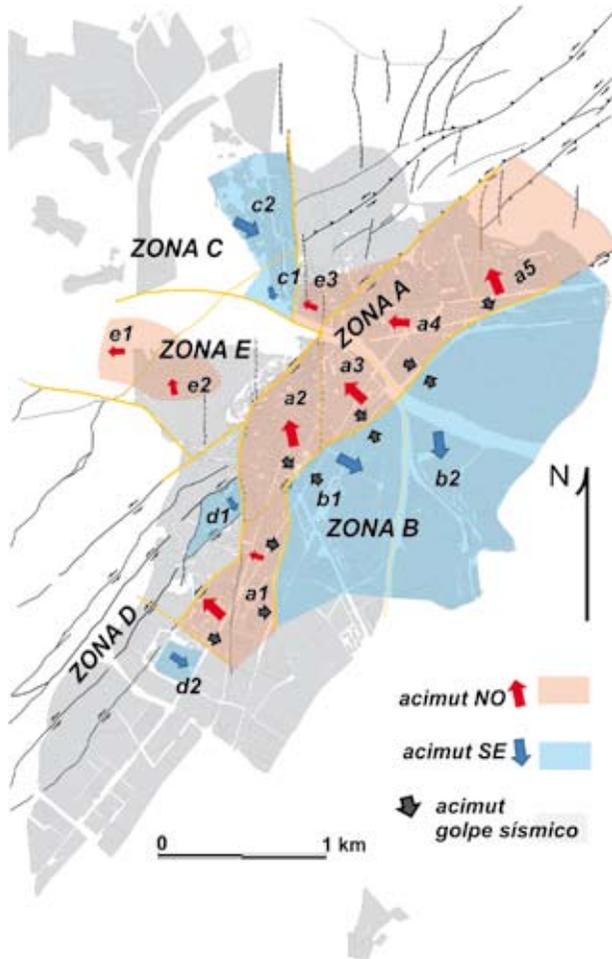


Figura 7. Sectorización de la ciudad en función de las principales estructuras tectónicas y litologías cartografiadas. Acimut del daño NO (flechas rojas), acimut del daño SE (flechas azules), (flechas grises).

Figure 7. The town plan divided into sectors according to the main tectonic and lithological structures charted. NW azimuth damage (red arrows), SE azimuth damage (blue arrows) and direction of seismic shock (grey arrows).

ONO-ESE. Se pueden distinguir varias subzonas: a2 y a5 (NNO-SSE), a1 y a3 (NO-SE) y a4 (ONO-ESE); zona E caracterizada por orientaciones de la deformación máxima variables desde NNO-SSE a NO-SE. Se pueden distinguir tres subzonas: e2 (NNO-SSE); e3 (NO-SE) y e1 (ONO-ESE).

- Zonas con sentido de la deformación hacia el SE: zona B y zona C caracterizadas por orientaciones de deformación máximas variables desde NO-SE hasta NNO-SSE (son diferentes porque se encuentran separadas por la zona A). Se pueden distinguir varias subzonas: b2 y c1 (NNO-SSE); y b1 y c2 (NO-SE). Zona D con orientaciones NO-SE de la deformación máxima. Las subzonas de la zona D atienden únicamente a su separación espacial.

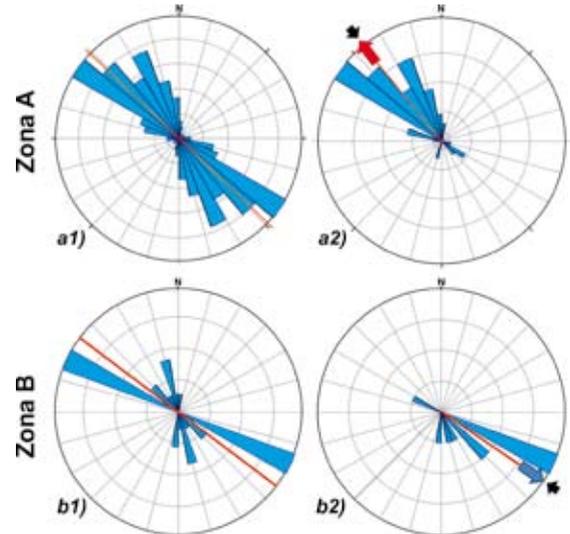


Figura 8. Rosa de orientaciones de la dirección de máxima deformación (1) y de sentido de la deformación (2) para la zona A (107 datos) y para la zona B (18 datos). Las rosas de sentido del daño presentan menor número de datos porque de algunos de los efectos inventariados no se puede obtener este dato.

Figure 8. Rose diagram of the direction of maximum deformation (1) and azimuth (2) for Zone A (107 data) and Zone B (18 data). The roses showing damage direction contain few data because many of the events registered do not reveal this information.

El cambio más evidente en las orientaciones de las trayectorias de máxima deformación se produce entre el límite de las zonas A y B, en la zona SE de la ciudad. La zona A presenta orientaciones mucho más norteadas que la zona B, aunque la principal diferencia radica en la orientación del sentido de la deformación (figura 8), sentido contrario al impulso de llegada de las ondas sísmicas. Las diferencias de ambas zonas no parecen estar relacionadas con la litología, ya que ambas zonas presentan en superficie diferentes tipos de materiales. Este hecho parece estar más relacionado con la continuación de la traza de la falla de desgarre inverso que se localiza en la zona SE de la ciudad (ver figuras 6 y 7).

Relación entre la orientación de los daños y parámetros focales

Orientación de daños vs acelerograma

En la ciudad de Lorca está instalado un acelerógrafo del Instituto Geográfico Nacional (IGN) que registró el evento. Del análisis del acelerograma se obtiene el odograma que muestra el movimiento 2D del terreno, pudiéndose definir las orientaciones principales de los vectores de desplazamiento en la localización del acelerógrafo. Las orientaciones de estos vectores (figura 9a) aparecen más norteadas que las direcciones

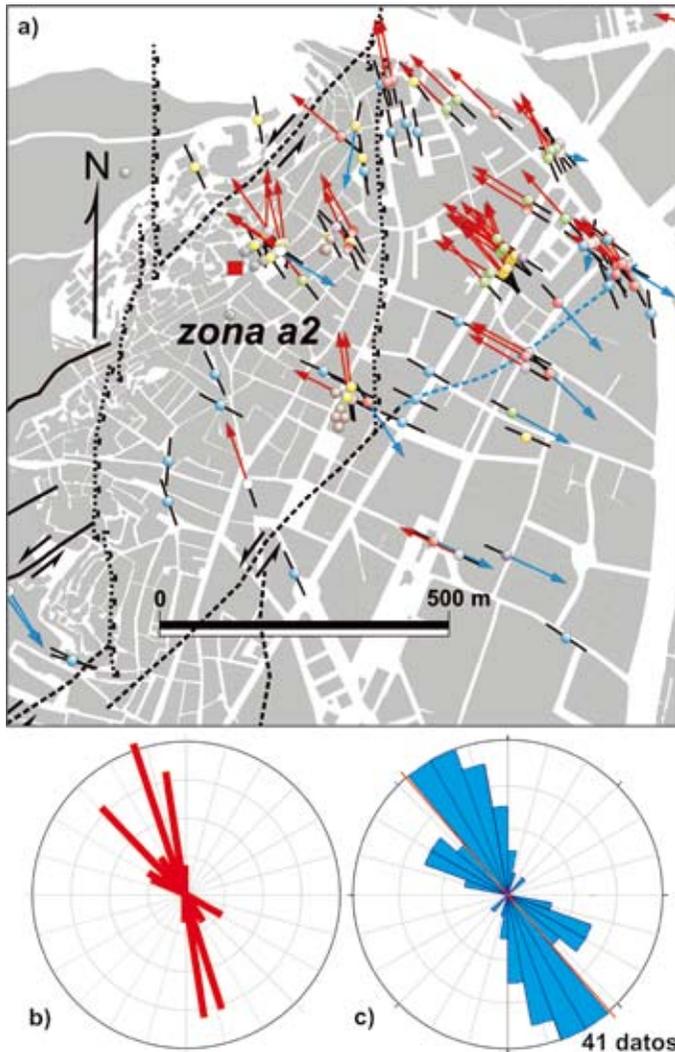


Figura 9. a) Localización del acelerógrafo del IGN (cuadrado rojo) en la zona a2 (ver leyenda en figura 3). b) Vectores de movimiento obtenidos del análisis del odograma de movimiento de la partícula en 2D del registro del acelerógrafo del IGN. c) Rosa de orientaciones de la dirección de máxima deformación para la subzona a2.
Figure 9. a) IGN's accelerograph (red square) is in subzone a2 (see legend in Fig. 3); b) motion vectors obtained from an analysis of the movement of particle 2D registered on the IGN accelerograph; and c) rose diagram of maximum strain orientation for subzone a2.

de deformación obtenidas del conjunto de los efectos inventariados en la ciudad (figura 4a). No obstante, si los comparamos con las direcciones de deformación obtenidas del análisis de la subzona en la que se localiza la estación del acelerógrafo (subzona a2), se observa que las orientaciones de los vectores de desplazamiento son paralelas a las orientaciones de deformación obtenidas en esa zona (figura 9b). Este hecho confirma que las orientaciones de deformación máxima obtenidas del análisis de los efectos, muestran la dirección de movimiento del suelo como consecuencia del terremoto. Por lo tanto, los datos de

orientación EAEs son cualitativamente comparables con los obtenidos a partir de los registros sísmicos en estaciones instrumentales.

Orientación de daños vs orientación falla (mecanismo focal)

En la mayoría de los trabajos sobre orientación de daños sísmicos en efecto cercano, se relaciona la orientación de los mismos con los efectos de la propagación preferente de las ondas paralela a la traza de la fractura por efecto de la directividad en la ruptura dinámica de la falla, definiendo un movimiento máximo perpendicular a la dirección de la falla que ha producido el evento (Somerville *et al.*, 1997). Estos autores asocian este movimiento normal al plano de falla se asocia a la propagación de la onda S polarizada en la horizontal. Esta relación parece ser más evidente en fallas de desgarre; ya que en fallas con más componente inverso la relación angular presenta mucha más dispersión (Howard *et al.*, 2005).

En el caso del terremoto de Lorca, el mecanismo focal calculado por el IGN muestra un mecanismo de falla direccional inversa con dos planos nodales orientados N127°E 59°SE y N040°E 69°NO. Los planos nodales del terremoto presentan una relación angular clara con las orientaciones de máxima deformación deducidas del total de efectos analizados: uno de ellos es perpendicular, y el otro es paralelo (figura 10). No obstante, el plano nodal que más se ajusta a la cartografía geológica de la zona (ver figura 6) es el orientado según N040°E, es decir el plano perpendicular a la orientación media de los daños observados en la ciudad de Lorca (N130°E). Además esa orientación es normal a la directividad de la propagación de las ondas S (N220°) obtenida por López-Comino *et al.* (2012).

Independientemente de la coincidencia en la orientación del total de los daños con la orientación de los

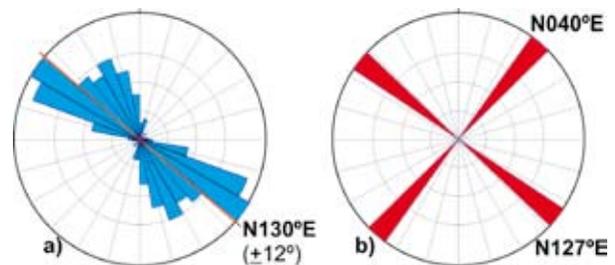


Figura 10. a) Rosa de orientaciones de la deformación máxima media para el conjunto de los efectos analizados. b) Orientaciones de los planos nodales para el terremoto de Lorca.
Figure 10. a) Rose diagram of the average maximum deformation according to the whole dataset; b) orientations of the nodal planes for the Lorca earthquake.

planos nodales del mecanismo focal del terremoto, es necesario resaltar que esa orientación es muy variable en los diferentes sectores analizados de la ciudad. Las orientaciones de máxima deformación en la subzona a2 (figura 9c) presenta una dispersión de más de 40° con respecto a la orientación media obtenida del análisis total de los daños en la ciudad (figura 4a).

Sentido del daño vs orientación falla (mecanismo focal)

Los datos inventariados de sentido de la deformación se reparten de forma heterogénea en la ciudad, aunque la mayor parte de ellos se localizan en las zonas A y B (ver figura 3). El límite entre estas zonas se ha definido exclusivamente por la presencia de dos tendencias claras en el sentido de los daños observados aunque ambas zonas presentan direcciones de máxima deformación subparalelas (ver figura 7): en la zona A los daños tienen un sentido preferente NO, mientras que en la zona B el sentido es fundamentalmente hacia el SE (figura 8). Este mismo efecto ha sido descrito por Motoki y Seo (2000) en el terremoto de Kobe de 1995. Estos autores definen dos zonas bien diferenciadas por el sentido opuesto de los daños observados en superficie (ambas zonas con intensidad VII, análoga a la registrada en el centro de Lorca), relacionando el sentido del daño con el movimiento de pulso registrado en los diferentes acelerógrafos que registraron el evento en la ciudad de Kobe.

Discusión y conclusiones

La metodología aplicada en este trabajo fue diseñada para el análisis de deformaciones de posible origen sísmico presentes en yacimientos arqueológicos y edificios históricos. En el caso del terremoto de Lorca, los resultados obtenidos con esta metodología de análisis nos ha permitido validar tanto la interpretación cinemática de los diferentes daños, como la metodología de cuantificación de la deformación a partir de los daños observados en estructuras arquitectónicas.

La poca dispersión de las orientaciones de máxima deformación obtenidas, tanto en el análisis de la totalidad de los datos (N130°E), como en el análisis en función del tipo de EAE inventariado, demuestra que la metodología es totalmente válida para su aplicación en la identificación y análisis de paleoterremotos y terremotos históricos (efecto cercano) en yacimientos arqueológicos y edificios históricos.

La orientación media de los daños (N130°) se explica por el efecto de la directividad: el movimiento

principal del suelo en la horizontal se produce con una orientación normal (NO-SE) a la dirección de propagación de las ondas S polarizadas en el plano horizontal (N220°E) (López-Comino *et al.*, 2012).

El hecho de que las orientaciones obtenidas del análisis de los efectos coincidan con las obtenidas del movimiento del suelo en el acelerógrafo del IGN, en la ciudad muestra que las orientaciones preferentes de daños son cuantitativamente comparables a los datos de movimiento 2D del terreno, obtenidos en estaciones de registro instrumental. Este hecho abre una nueva vía de investigación en el análisis de los daños de terremotos instrumentales de efecto cercano en relación incluso la posibilidad de relacionar estas deformaciones superficiales con el estado de deformación tectónico de la zona (González-Casado *et al.*, 2006).

La construcción de las trayectorias de deformación máxima nos permite completar el mapa de movimientos del terreno en las diferentes áreas en las que no se situaban estaciones de registro instrumental. Las variaciones en la orientación de estas trayectorias parecen tener una relación clara con la traza de las fallas que se sitúan en las zonas más afectadas de la ciudad de Lorca, condicionadas por la presencia de fallas con un importante control en la sedimentación cuaternaria; fallas que le confieren al terreno un comportamiento anisótropo frente a la propagación de las ondas.

En la actualidad, se analiza por un lado (a) el grado de daño, en relación con la distancia epicentral y el efecto local (efecto suelo); y por otro lado (b) la localización de los daños, en relación con la distancia al epicentro y la directividad de la transmisión de las ondas. Los resultados obtenidos del análisis del terremoto de Lorca, muestran que el análisis de los daños orientados puede aportar mucha información a la hora de establecer anisotropías en el terreno que puedan inducir cambios en la orientación de los daños, datos directamente aplicables al análisis de la peligrosidad y vulnerabilidad sísmica en poblaciones con fallas potencialmente sísmicas en las proximidades.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con los proyectos EDASI (Fundación MAPFRE) y RESCATELO (CGL2011-14925-E); y es una contribución a los proyectos INQUA project 1229 (EEE metrics) e IGCP 567.

Referencias

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)*, UNED, Madrid, 137 pp.
- 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, Madrid. 96 pp.
- González-Casado, J. M., Gumiel, P., Giner-Robles, J.L., Campos, R. Moreno, A. 2006. Calcite e-twins as markers of recent tectonics: insights from Quaternary karstic deposits from SE Spain. *Journal of Structural Geology*, 28 (6), 1084-1092.
- Guidoboni, E. 1989. *I terremoti prima del Mille in Italia e nell'area Mediterranea: storia, archaeologia, sismologia*. SGA-Instituto Nazionale di Geofisica. Bologna. 765 pp.
- Howard J.K., Tracy, C.A. and Burns R.G. 2005. Comparing observed and predicted directivity in near-source ground motion. *Earthquake Spectra*, 21 (4), pp.1063-1092.
- López-Comino, J.A., Mancilla, F., Morales, J. and Stich, D. 2012. Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*, 39, L03301, doi:10.1029/2011GL050498.
- Martínez-Díaz, J. J. 2002. Stress field variety related to fault interaction in a reverse oblique-slip fault: The Alhama de Murcia Fault, Betic Cordillera, Spain. *Tectonophysics*, 356, 291-305.
- Michetti A. M., Esposito, E., Guerrieri, L., Porfido, S. E., Serva, L., Tatevossian, R., Vittori, E., Audemard, F., Asuma, T., Clague, J., Comerci, V., Gürpınar, A., McCalpin, J., Mörner, N.A., Ota, Y., Roghazin E. 2007. Intensity Scale ESI-2007. *Memorie Descrittive Della Carta Geologica D'Italia*, 74. APAT, SystemCart Srl, Roma, Italia.
- Motoki, K. and Seo, K. 2000. Strong motion characteristics near the source region of the Hyogoken-Nanbu earthquake from analyses of the directions of structural failures. 12th World Conference on Earthquake Engineering. Paper 959, 6 pp.
- Nikonov, A. 1988. On the methodology of archaeoseismic research into historical monuments. In: *Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites* (G. Marinov and G. Koukis, Eds. Balkema, Rotterdam. 1325-1320.
- Rodríguez-Pascua, M.A., Pérez-López, R., Silva, P.G., Giner-Robles, J.L., Garduño-Monroy, V.H. and 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., Giner-Robles, J.L., Silva, P.G., Garduño-Monroy, V.H. y Reicherter, K. 2012. Efectos Arqueológicos del terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011 en su Patrimonio Cultural. Nuevas estructuras de deformación y reactivación de estructuras anteriores pertenecientes al terremoto de 1674. *Geo-Temas*, 13.
- Silva, P.G., Goy, J. L. Somoza, L., Zazo, C., Bardaji, T.1993. Landscape response to strike-slip faulting linked to collisional settings: Quaternary tectonics and basin formation in the Eastern Betics, southeastern Spain. *Tectonophysics*, 224, 289-303.
- Somerville, P.G., Smith, N.F., Graves, R.W., y Abrahamson, N.A. 1997. Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letter*, 68, 199-222.
- Stiros, S., Jones, R.E. 1996. *Archaeoseismology*. Institute of Geology and Mineral Exploration. Fitch Laboratory Occasional Paper. Stiros S. and Jones, R.E., (Eds). Atenas. 268 pp.

Recibido: junio 2012
Revisado: julio 2012
Aceptado: agosto 2012
Publicado: octubre 2012