

Estudios paleosismológicos en España: una revisión

M.A. Rodríguez-Pascua

Facultad de Farmacia. Universidad San Pablo CEU. 28668 Boadilla del Monte. Madrid (Spain).
E-mail: marodpas@ceu.es

RESUMEN

La paleosismología es fundamental en las investigaciones de fuentes sismogénicas y en los estudios de peligrosidad y riesgo sísmico. Esta se hace más necesaria en regiones tectónicas en la que las tasas de movimiento de las fallas sismogénicas es baja, como es el caso de la Península Ibérica. Sin embargo, los estudios paleosismológicos realizados hasta el momento en España son muy locales y se concentran en la Cordillera Bética Oriental, Cordillera Costero Catalana y Cuenca del Tajo. Los estudios recopilados en este artículo ofrecen datos importantes acerca de la actividad sísmica de fallas que, en muchos casos, no presentan actividad instrumental destacable o escasos datos históricos. Todos estos datos deberían tenerse en cuenta en evaluaciones de peligrosidad y riesgo sísmico, y ser ampliados en zonas en las que estos datos sean insuficientes o se carezca de ellos. Además, se ha realizado una discusión de los trabajos sobre sismitas antiguas, de edad Mioceno Superior-Plioceno.

Palabras clave: fallas activas, fallas en trinchera, paleosismicidad, sismitas

Paleoseismological studies in Spain: a review

ABSTRACT

Paleoseismology is essential in the research of seismogenic sources, seismic hazard and risk studies. It is even more necessary in tectonic regions with low tectonic slip rates, such as the Iberian Peninsula. However, paleoseismological studies carried out up to date in Spain are very local and concentrated in the Betic and Catalanian Coastal Chains and the Tajo Basin. The compilation of paleoseismological studies, shows important data about the seismic activity of faults that, in many cases, they have no instrumental activity or historical seismic data. All these data must be taken into account in the evaluation of seismic hazard and risk, and more research is needed in zones without data or insufficient record. Several works regarding seismites (Upper Miocene-Pliocene) have been discussed as well.

Key words: active faults, paleoseismicity, seismites, trenching

Introducción

La paleosismología es una rama de la geología que se encarga del estudio mediante técnicas geológicas de los terremotos que han tenido lugar antes de las primeras crónicas históricas. Surge en 1969, con un trabajo de Seilacher, en el que estudia sedimentos lacustres deformados por terremotos, acuñando el término "sismita" para las estructuras de deformación de origen sísmico en sedimentos no consolidados (Seilacher, 1969).

Mc Calpin y Nelson (1996) establecen que el límite inferior en estudios de paleosismología está comúnmente entre el Holoceno inferior (7 a 10 ka) y el medio (4 a 6 ka), pero que en zonas donde la recurrencia sísmica es mucho más dilatada en el tiempo deben extenderse hasta el Pleistoceno Inferior.

Sin embargo, en algunos de los estudios de paleosismología realizados en España se ha considerado

"informalmente" todo el Cuaternario, debido a las bajas tasas de actividad tectónica y la poca precisión de las dataciones de los sedimentos recientes, especialmente los de facies continentales. Uno de los objetivos inmediatos de los futuros estudios paleosismológicos será acotar este período de tiempo dentro del Cuaternario hasta reducirlo, cuanto sea posible, al Holoceno y Pleistoceno superior. En esta recopilación se han incluido, de momento, todos los estudios referidos a materiales cuaternarios.

En los últimos años, la identificación y análisis de paleoterremotos se ha separado en dos líneas de investigación:

a) estudio de sismitas antiguas. Se trata de estudios de carácter sedimentológico y/o tectónico que consisten en el análisis de estructuras sedimentarias de deformación en el registro geológico, independientemente de su edad, y que tienen un probable origen sísmico. Estos estudios, por la edad

tan antigua de sus terremotos (Plioceno o más antiguos), no se suelen utilizar en los cálculos de peligrosidad sísmica, aunque existen algunas excepciones que se verán más adelante

- b) estudios de paleosismicidad aplicados a los estudios de peligrosidad y riesgo sísmico. Estos estudios tienen como último objetivo ampliar el catálogo sísmico en una región para mejorar sus estimaciones de peligrosidad sísmica, especialmente en aquellas zonas con actividad baja o muy baja, como es el caso de la Península Ibérica.

La paleosismología aporta dos grandes grupos de datos complementarios y relacionados entre sí, que podríamos definir como datos directos (fallas) y datos indirectos (sismitas, tsunamis, etc).

Los primeros corresponden al estudio directo de las roturas superficiales de terremotos en los que podemos estudiar las fallas directamente o mediante la realización de trincheras. De este trabajo podemos extraer datos precisos sobre el salto de falla, longitud de rotura y datación del evento, por lo que podemos calcular parámetros sísmicos como la magnitud.

Los datos indirectos están ligados tanto a las deformaciones producidas por el paso de las ondas sísmicas en la superficie terrestre, especialmente las referidas a sedimentos no consolidados, como al efecto en relieve de las rupturas superficiales de terremotos (geomorfología sísmica). En ambos casos se estudian las consecuencias en superficie de un terremoto, pero no directamente la falla en cuestión. Las sismitas nos pueden dar información de la existencia de terremotos en zonas en las que las fallas no afloran en la superficie, siendo también indicadores de la magnitud del seísmo. Tanto sismitas como geomorfología sísmica pueden ampliar considerablemente la información referida a una rotura superficial.

Estudios de sismitas antiguas (Mioceno superior y Plioceno)

En este capítulo se han incluido las sismitas que han sido descritas en rocas sedimentarias del Mioceno superior y Plioceno, que se consideran dentro del período neotectónico de la Península Ibérica (al menos desde que lleva instalado el último campo de esfuerzos). Según Herráiz *et al.* (2000) el último campo de esfuerzos lleva instalado en la Península Ibérica desde el Mioceno superior. Las sismitas más recientes, de edad Cuaternario, han sido incluidas en el siguiente apartado dedicado a la paleosismología.

En España, el primer trabajo de sismitas lo publica

Montenat (1980), que describe volcanes de arena en rocas messinienses de San Miguel de Salinas (Alicante). En los años ochenta prácticamente no hay trabajos destacables, tan sólo pequeñas notas en el 1^{er} Congreso Geológico de España (Bustillo Revuelta y Martín Escorza, 1984) y el IX Congreso Nacional de Sedimentología (Rodríguez Fernández y Vera, 1986). La mayoría de las sismitas antiguas han sido descritas en la Cordillera Bética, aunque también hay algunas descritas en la Cuenca del Tajo (Fig. 1).

Datos paleosísmicos miocenos de la Cordillera Bética

Se encuentran distribuidos en tres zonas principales: Prebético de Albacete, Cuenca del Bajo Segura, y Cuenca de Granada (Fig. 2). Todos ellos corresponden a sismitas.

- *Prebético de Albacete*: los trabajos aquí realizados corresponden a Calvo *et al.* (1998), Rodríguez Pascua (2001) y Rodríguez Pascua *et al.* (2000a, 2000b, 2001 y 2003), en los que estudian las sismitas localizadas en las cuencas neógenas lacustres del Prebético de Albacete (Turolense). Estos lagos se desarrollaron debido a la aparición de fallas normales E-O que generaron cuencas sedimentarias y acumulaciones estables de agua. Dichas fallas son consecuencia de la última etapa extensiva, definida por numerosos autores en la Cordillera Bética durante el Messiniense. Estos autores llevaron a cabo un completo registro de estructuras paleosísmicas con magnitudes comprendidas entre 4 y 6. La datación de eventos se realiza asumiendo el carácter anual de la sedimentación varvada, registrando 73 paleoterremotos repartidos en 9.446 años. La periodicidad media resultante es de 128 años, con una magnitud media de 4,2.

Los estudios identificaron una correlación entre los datos paleosísmicos turolenses y la sismicidad actual mediante la aplicación de la Ley de Gutenberg-Richter (Rodríguez Pascua, 2001, Rodríguez Pascua *et al.*, 2000a), ofreciendo el mismo resultado (0,86) para el parámetro "b" en ambos casos. Otro punto de correlación es la dimensión fractal de la paleosismicidad, sismicidad instrumental y la distribución de fallas, que es la misma en los tres casos, indicando por tanto que el fenómeno sísmico se mantiene desde el Turolense hasta la actualidad (Rodríguez Pascua *et al.*, 2003). En este caso se han incluido en este apartado por la edad de los materiales donde se encuentran estas estructuras, pero dada la excepcionalidad de los afloramientos y su extrapolación a la actualidad se pueden considerar dentro del período paleosismológico.

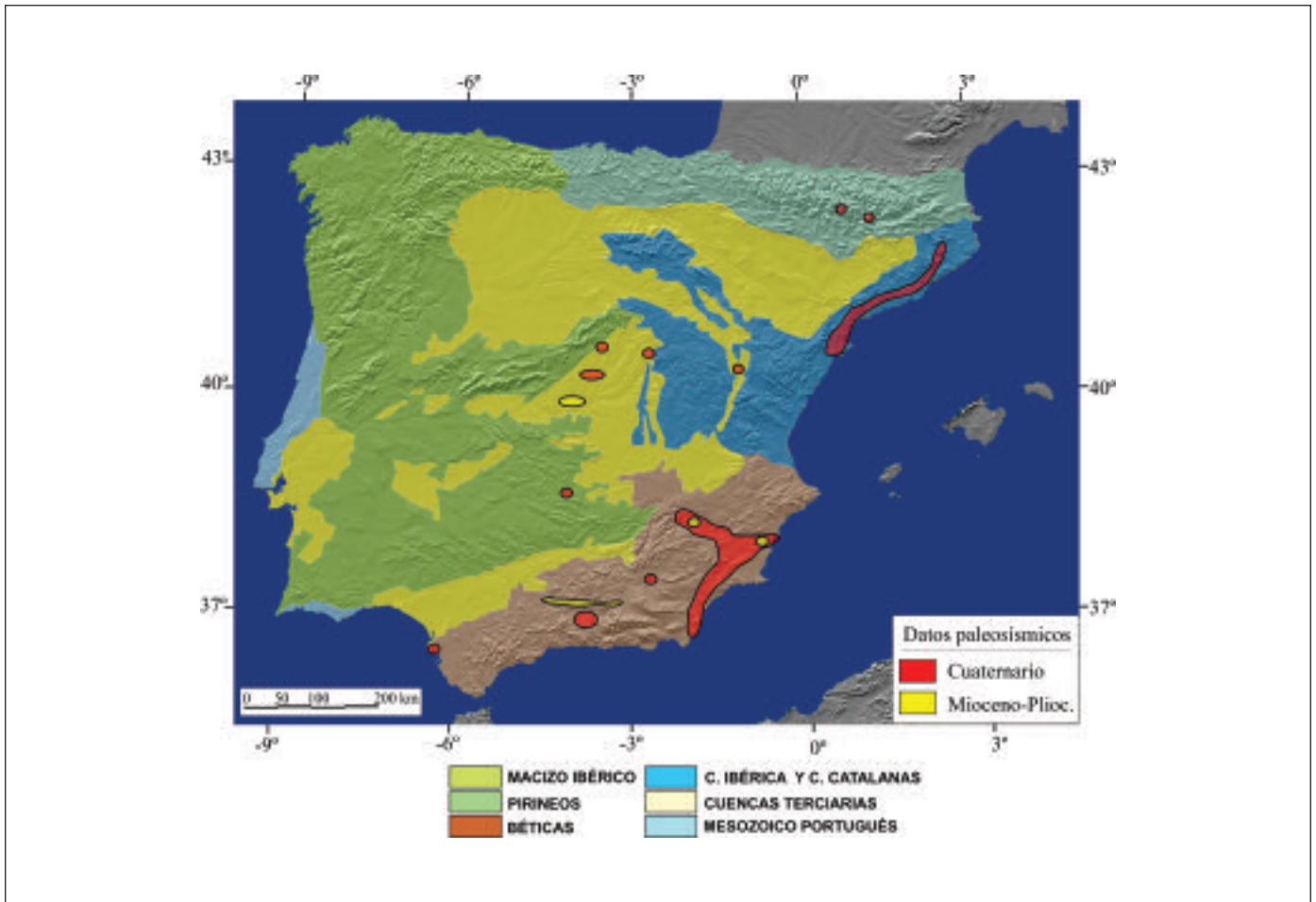


Fig. 1. Distribución de estudios paleosismológicos en España (no aparecen las islas Canarias por no haber estudios paleosismológicos publicados), teniendo en cuenta el intervalo temporal Mioceno-Cuaternario

Fig. 1. Location of the paleoseismological studies in Spain (the Canary Islands are not represented in this figure because there are not published paleoseismological studies), in the temporal interval Miocene-Quaternary

- *Cuenca del Bajo Segura*: Montenat (1980) publica el primer trabajo sobre sismitas en las arenas mes-sinienses de San Miguel de Salinas (Alicante). Alfaro y Soria (1996) realizan un estudio detallado de estas sismitas en un nuevo afloramiento localizado en la Cañada del Judío, a 2 km al sur de San Miguel de Salinas. Los sedimentos estudiados son alternancias rítmicas de arenas y lutitas, de 30 a 200 cm de potencia, con estratificación cruzada planar y ripples de corriente, sedimentados en una plataforma marina somera. Las estructuras son de edad Mioceno superior (Messiniense) e interpretadas como volcanes de arena, almohadillas, bolas, cuñas detríticas, diques de arena, microbrechas y microfallas. En total estos autores diferencian 11 eventos de $M \geq 5$. Estévez *et al.* (1993 y 1994) interpretaron como sismitas cuñas detríticas situadas al norte de la Cuenca del Bajo Segura.

Recientemente Alfaro *et al.* (2002) reinterpretaron estas estructuras como resultado del oleaje de tormenta. Aún así, estos autores indican que algunas de estas estructuras podrían tener un origen sísmico.

Taboada *et al.* (1993) establecieron períodos de recurrencia para terremotos de magnitud M_s 6,7 y 7,0 de 1 ka y 2 ka, respectivamente. Se basan en que los pliegues asociados a la falla del Bajo Segura comenzaron a deformarse al final del Plioceno (hace 2 Ma) o al comienzo del Cuaternario (hace 1,5 Ma).

- *Cuenca de Granada*: Rodríguez Fernández y Vera (1986) localizaron sismitas en arenas calcáreas de ambiente marino y edad Messiniense en la cuenca de Granada (Buentar) y en pequeñas cuencas intermontanas al este (Cuevas de San Marcos, Iznájar, Puentes de Cesna, Montefrío) y

al oeste de la misma (La Peza). Las estructuras son estratificaciones cruzadas volcadas (pliegues recumbentes), *slumps*, microfallas y almohadillas. No asignaron magnitudes a estas sismitas, pero al existir licuefacción de sedimentos implica que la $M \geq 5$.

- **Cuenca del Guadalquivir:** fuera de la Cordillera Bética, en el SO de la depresión del Guadalquivir, Clauss (1993) localizó sismitas en el Plioceno inferior-medio del sector de Arcos de la Frontera. Las estructuras corresponden a discos y pilares, diques de arena (denominados por el autor canales de fluidificación), laminación cruzada deformada y estructuras en flama, concentradas en 5 niveles distintos. El tamaño de las sismitas es de centimétrico a decimétrico y se desarrollan en 11 m de arenas silíceas de grano medio con estratificación cruzada e intercalaciones de margas de espesor variable, entre centimétrico y métrico. Este autor no realizó interpretación alguna sobre la magnitud sísmica de los eventos que las produjeron, pero los fenómenos de licuefacción sólo se generan con $M \geq 5$.

Cuenca del Tajo

Los datos aportados por Bustillo Revenga y Martín Escorza (1984) hacen referencia a la aparición de sismitas en materiales lacustres someros del Mioceno en las localidades toledanas de Villaluenga y Añover de Tajo (Fig. 4). Observaron fracturas, microfallas y plegamientos sinsedimentarios en los materiales detríticos de la formación lacustre que asociaron a sismos, pero no les otorgaron magnitud alguna. Al observarse fenómenos de licuefacción en arenas se puede indicar que el sismo responsable de estas estructuras tuvo una $M \geq 5$.

Estudios de paleosismicidad

Es los años 90 del siglo XX se realizan los primeros estudios de paleosismología, con el propósito de ampliar el catálogo sísmico, con trabajos en la Cordillera Bética, Cuenca del Tajo y Cordillera Costero Catalana (Fig. 1). Durante el inicio del siglo XXI aparecen más trabajos centrados en estas mismas áreas y esta disciplina se tiene en cuenta, por primera vez, en el VI Congreso Geológico de España, en el que se organiza un simposio de Neotectónica y Paleosismicidad. Sin embargo, debido a la escasez de trabajos de investigación, los estudios paleosismológicos realizados hasta el momento sólo ofrecen informa-

ción parcial de áreas limitadas y no una visión más amplia del fenómeno sísmico en la Península Ibérica.

Paleosismicidad de la Cordillera Bética

La Cordillera Bética es la zona con mayor abundancia de datos paleosísmicos dentro de la Península Ibérica, ya que la actividad sísmica en esta cordillera supone un fuerte atractivo para los investigadores en paleosismología.

En este caso podemos encontrar tanto sismitas como fallas con actividad paleosísmica cuaternaria. Comenzaremos con las fallas identificadas como activas por criterios paleosísmicos, continuaremos con las sismitas de las Cuencas del Bajo Segura, Guadix-Baza y los tsunamis del Golfo de Cádiz (Fig. 2).

- **Fallas de Alhama de Murcia y Palomares:** la Falla de Alhama de Murcia, de orientación bética (NE-SO), tiene un movimiento de desgarre sinistrorso con componente inversa. Su traza se extiende desde Murcia hasta Huércal-Overa, en el sur, cortando materiales metamórficos de las Zonas Internas deformados en la orogenia alpina. Limita las depresiones neógenas del Guadalentín por el oeste y de Huércal-Overa por el norte. Martínez-Díaz y Hernández-Henrile (1999) segmentan esta falla en cuatro tramos:
 - Huércal Overa-Lorca
 - Lorca-Totana (el que mayor sismicidad concentra)
 - Totana-Alhama de Murcia
 - Alhama de Murcia-Alcantarilla.

Ha sido estudiada en profundidad por Martínez-Díaz (1998), Martínez-Díaz y Hernández-Enrile (1999), Martínez-Díaz *et al.* (2001a y 2001b), Hernández-Enrile *et al.* (2000) y Masana *et al.* (2001a). Esta falla ha tenido actividad sísmica en tiempos históricos con intensidad entre VII y VIII: años 1579, 1674, 1818, 1743, 1907, 1911 y 1944. En estos trabajos se estudió la actividad de esta falla mediante sismotectónica y técnicas paleosísmicas (elaboración de trincheras y datación radiométrica [U-Th] de eventos), geomorfología y segmentación de fallas. Mediante estas técnicas deducen la presencia de tres eventos de magnitud entre 6,0 y 6,5, con una recurrencia de 40.000 años y una tasa de movimiento de 0,06 mm/año. Para el tramo Lorca-Totana de la falla Alhama de Murcia (15 km, con componente de movimiento inverso-direccional) calcularon una tasa de movimiento vertical de 0,08 mm/año y un intervalo de recurrencia de 4.818 años.

Mediante estudios estratigráficos, sedimentológicos y geomorfológicos de abanicos aluviales cuaternarios afectados por la falla de Alhama de Murcia, Martínez-Díaz *et al.* (2003) obtuvieron una tasa de movimiento de 0,21 mm/año para los últimos 30.000 años, superior a los 0,06-0,15 mm/año obtenidos mediante el estudio de la falla en trincheras. Mediante análisis geomorfológico, Soler *et al.* (2003) obtuvieron tasas de movimiento similares a las calculadas por los anteriores autores en los eventos más recientes de las trincheras realizadas.

En una revisión más reciente para el tramo Lorca-Totana, Masana *et al.* (2004a) identifica-

ron dos terremotos seguros y uno posible de $M_w = 6,1-7$ en los últimos 27 ka, datándolos mediante U-Th y termoluminiscencia. La edad obtenida para el primero es entre el año 1450 y el 1650, y por tanto asociado al terremoto de Lorca de 1579 (MKSI = VII), y para el segundo entre 2130 BC-830 AC. El tercer terremoto, al que dan la posibilidad de ser un evento múltiple, lo fechan en 16.700 años. El período de recurrencia que obtienen es de 14 ka, pero si se tienen en cuenta exclusivamente los dos eventos seguros, el período que calculan es en torno a 2 ka. La tasa de movimiento vertical calculada es de 0,04-0,35 mm/año, movimiento en dirección de 0,06-0,53

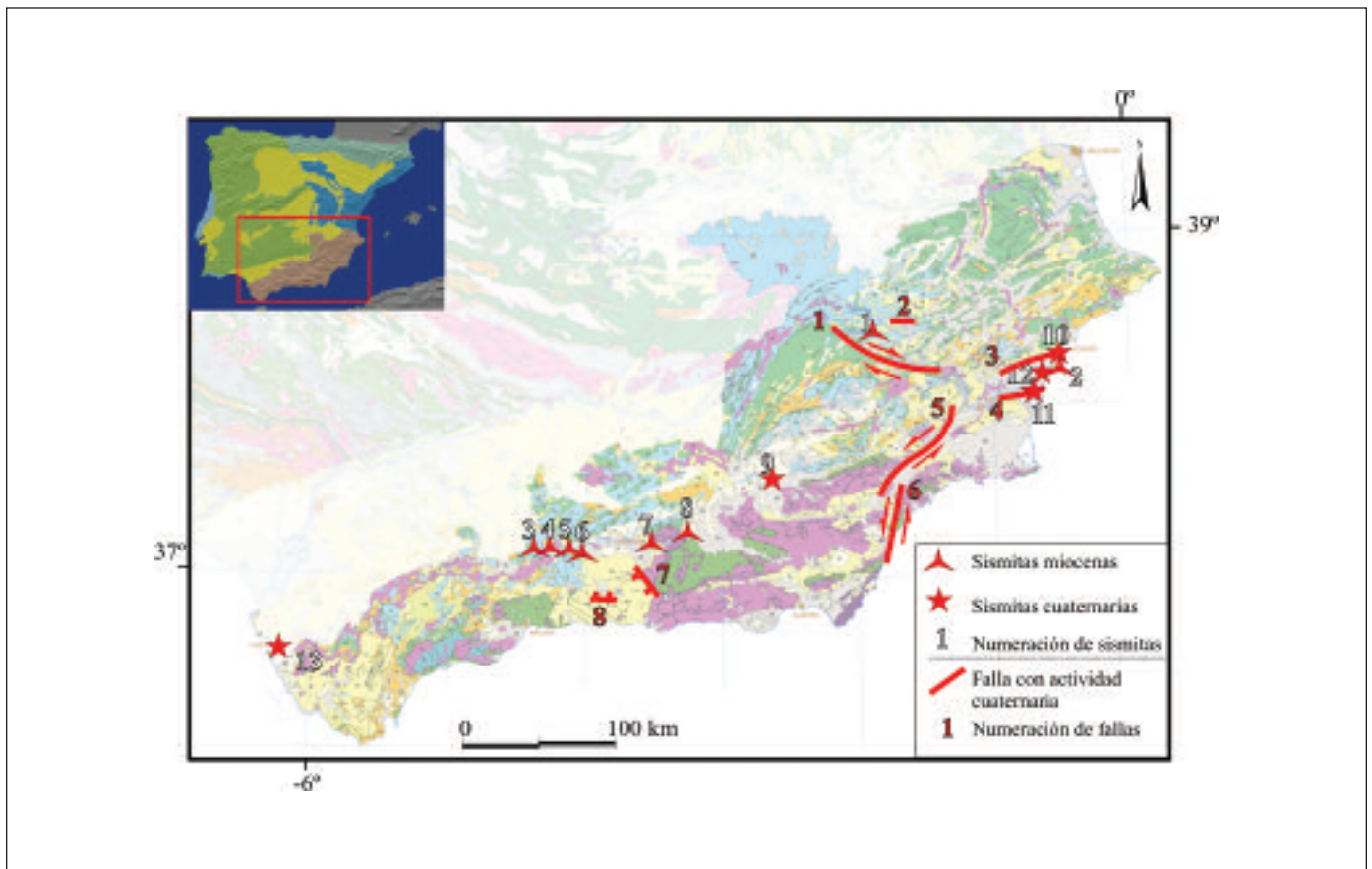


Fig. 2. Principales estudios de paleosismicidad en la Cordillera Bética. Sismitas del Mioceno: 1) Cuencas lacustres del Prebético de Albacete; 2) Cuenca del Bajo Segura (San Miguel de Salinas); 3) Cuevas de San Marcos; 4) Iznájar; 5) Puentes de Cesna; 6) Montefrío; 7) Buentar y 8) La Peza. Sismitas del Cuaternario: 9) Cuenca de Guadix-Baza; Cuenca del bajo Segura: 10) Sierra del Colmenar; 11) Sierra del Moncayo; 12) Almoradí 13) Tsunamis de Cádiz. Fallas con actividad paleosísmica cuaternaria: 1) Socobos-Calasparra; 2) Tobarra-Cordovilla; 3) Crevillente; 4) Bajo Segura; 5) Alhama de Murcia y Tollos-Rodeos; 6) Palomares; 7) Padul y 8) Ventas de Zafarraya. Mapa geológico base 1:2.000.000, IGME (2004)

Fig. 2. Location of the main paleoseismological studies in the Betic Chain. Miocene seismites: 1) Lacustrine Basins of the Prebetic Zone in Albacete; 2) Bajo Segura Basin (San Miguel de Salinas); 3) Cuevas de San Marcos; 4) Iznájar; 5) Puentes de Cesna; 6) Montefrío; 7) Buentar and 8) La Peza. Quaternary seismites: 9) Guadix-Baza Basin; Lower Segura Basin; 10) Colmenar Mountains; 11) Moncayo Mountains; 12) Almoradí 13) Tsunamis of Cádiz. Faults with Quaternary seismic activity: 1) Socobos-Calasparra; 2) Tobarra-Cordovilla; 3) Crevillente; 4) Bajo Segura; 5) Alhama de Murcia and Tollos-Rodeos; 6) Palomares; 7) Padul and 8) Ventas de Zafarraya. Geological base map: 1:2.000.000, IGME (2004)

mm/año, y un deslizamiento neto de 0,07-0,66 mm/año durante los últimos 30 ka.

Masana *et al.* (2004b) estudiaron el segmento suroccidental de la falla, el tramo Huércal-Overa-Lorca. Realizaron cuatro trincheras en este segmento, observando importantes deformaciones en abanicos cuaternarios y evidencias de fallas inversas. Identificaron dos eventos, el más antiguo entre 39 ka y 780 AD con una M_w mínima de $6,3 \pm 0,1$, y el segundo evento posterior a 540 AD. Las dataciones, realizadas mediante termoluminiscencia, así como los resultados, son preliminares.

Silva *et al.* (1997a) llegaron a la misma conclusión que los trabajos que se acaban de indicar, pero con técnicas diferentes puesto que utilizaron indicadores geomorfológicos para estudiar la actividad de esta falla. Estos corresponden al análisis de estructuras de desplazamiento sísmico en superficies aluviales y coluviales del Pleistoceno superior-Holoceno. La magnitud máxima (M_b) que asignaron a esta falla es de 6,5, con desplazamientos en la vertical entre 0,2 y 2,5 m. También identificaron la actividad cuaternaria de la Falla de Palomares mediante las mismas técnicas.

- *Falla de Tollos-Rodeos*: esta falla de dirección NNE-SSO es paralela a la de Alhama de Murcia y fue estudiada por Silva *et al.* (1996), quienes encontraron actividad paleosísmica de edad Pleistoceno superior asociada a sismitas, deslizamientos cosísmicos, facetas triangulares y captura del río Mula por el Segura. Las sismitas las localizaron en sedimentos fluviopalustres depositados en embalsamientos generados por la obturación de cauces por deslizamientos cosísmicos. Las sismitas corresponden a pseudonódulos, convolutas, discos y pilares, y laminaciones onduladas. Estas estructuras están asociadas a fenómenos de licuefacción, por lo que su magnitud ha de ser superior a 5. Para el caso de los deslizamientos le otorgaron la misma magnitud.
- *Fallas de Crevillente y Bajo Segura*: como ya se ha mencionado en el apartado de la Cuenca del Bajo Segura, estas dos fallas de dirección NE-SO presentan actividad paleosísmica asociada a sismitas localizadas en las proximidades de las mismas (Alfaro *et al.*, 1999).
- *Fallas de Socovos-Calasparra*: la Falla de Socovos-Calasparra corresponde al límite de transferencia NE del Arco Estructural Cazorla-Alcaraz-Hellín; es un desgarre destrorso, con una traza que supera los 200 km de longitud. Rodríguez Pascua (2001) indica la actividad reciente (Mioceno superior-Cuaternario) de esta falla por criterios geomorfológicos (facetas triangulares).
- *Fallas de Ventas de Zafarraya y de Padul*: la Falla de Ventas de Zafarraya limita la Cuenca de Granada al sur, tiene carácter normal y una dirección E-O. Esta falla activa fue estudiada por Reicherter (2001), quien identifica y data 3 eventos sísmicos mediante la realización de trincheras en la falla. El primer evento data de hace 15.900 a 10.100 años, con un salto de 1 m, el segundo se produjo hace 2.940 años, con una ruptura superficial de 1 m de salto; y el tercero tiene 2.315 años de edad y 70 cm de salto. También describió sismitas (diques y cráteres de arena) asociados a estos eventos sísmicos. La magnitud máxima que indicó Reicherter (2001) para una ruptura de 15 km en esta falla es superior a 6.
- *La Falla de Padul* limita al NE la Cuenca de Padul-Nigüelas (Zona Interna de la Cordillera Bética), tiene una dirección NO-SE y buza hacia el SO. Separa dolomías metamorfozadas del Triásico (Complejo Alpujarride) de materiales detríticos cuaternarios y plio-cuaternarios de la cuenca que limita y su extensión es de aproximadamente 12 km. Alfaro *et al.* (2001b) realizaron un estudio paleosísmico de esta falla activa desde el Mioceno superior, sin actividad instrumental e histórica destacable, e identificaron tres saltos de falla que datan mediante C^{14} : 42.000, 34.000 y 33.000 años. También encontraron evidencias geomorfológicas y estructurales de la actividad cuaternaria de esta falla y observaron estructuras de licuefacción (diques de arena y bolas), por lo que los eventos registrados han de tener una $M \geq 5$.
- *Falla de Pozohondo*: Rodríguez Pascua *et al.* (2005), basándose en el trabajo sedimentológico y petrológico de García del Cura *et al.* (1979) y evidencias neotectónicas propuestas por Rodríguez Pascua, (2001), identificaron una zona de *graben* con ruptura superficial (cosísmica) en el sector SE de ésta falla (segmento Tobarra-Cordovilla). Mediante el reconocimiento de evidencias geomorfológicas primarias se estima una magnitud máxima de 6,8 (M_w), aplicando las leyes empíricas de Wells y Coppersmith (1994). Por otro lado, la ecuación de difusión aplicada sobre materiales no consolidados del escarpe de falla indica una edad no superior a 2 ka.
- *Falla de la dolina de Portol (Mallorca)*: el terremoto de Palma de 1851 (MKS = VII) produjo importantes daños en la isla, llegando a tener ruptura superficial, la cual fue estudiada por Silva *et al.* (1999). La ruptura superficial que encontraron es de carácter inverso, dentro de un campo de esfuerzos regional extensivo y que asocian a fenómenos de *roll over* en una falla normal mayor. La defor-

mación de la falla llega a afectar a construcciones humanas, su dirección es N158-136E y buza 27° hacia el SO. El salto inverso acumulado es de 5,58 m, provocando un desplazamiento máximo de la superficie actual del terreno de 0,88 m, que da lugar al escarpe inverso visible en el terreno. La traza de la falla se encuentra dentro del área epicentral calculada mediante isosistas.

- **Cuenca del Bajo Segura:** la Cuenca del Bajo Segura se localiza en el extremo oriental de la Cordillera Bética, iniciándose su sedimentación durante el Plioceno y abarcando todo el Cuaternario. Contiene numerosas discontinuidades estratigráficas que indican en fuerte control tectónico de esta cuenca. Alfaro *et al.* (1995, 1999 y 2001a) identifican sismitas en tres puntos de la Cuenca del Bajo Segura: Almoradí, Sierra del Colmenar y Sierra del Moncayo.

En la zona de Almoradí, Alfaro *et al.* (1995) realizaron una serie de sondeos en materiales cuaternarios en los que observaron estructuras como diques de arena, estructuras en champiñón, microfallas y convolutas. Se trata de sismitas que se dividen en 5 niveles asociados a otros tantos eventos sísmicos con $M \geq 5$.

En la Sierra del Colmenar (al noroeste de la Cuenca del Bajo Segura) se encuentra la Formación Sucina, formada por arenas, conglomerados y limos de origen continental del Pleistoceno medio. Alfaro *et al.* (1999 y 2001a) observan en cuatro afloramientos diferentes estructuras de carga con gradiente inverso, por lo que les asignan un origen sísmico ($M \geq 5$). La falla sismogénica a la que asocian estas estructuras es la Falla de Crevillente.

El área de la Sierra del Moncayo limita al sur la Cuenca del Bajo Segura, actuando como límite de separación la Falla del Bajo Segura. En esta zona se encuentra la Formación cuaternaria de Arenas del Moncayo, correspondiente a arenas eólicas con acumulaciones de bivalvos y gasterópodos. Las sismitas estudiadas son estructuras en gota indicadores de $M \geq 5$, que los autores asocian a la actividad sísmica de la Falla del Bajo Segura.

- **Cuenca de Guadix-Baza:** esta cuenca intermontana se localiza en el sector central de la Cordillera Bética y contiene sedimentos lacustres del Plioceno y del Cuaternario. Las facies del paleolago donde aparecen las estructuras estudiadas por Alfaro *et al.* (1997) son sedimentos de margen lacustre con arenas, limos y arcillas con intercalaciones de algunos niveles de gravas. Las sismitas que describen son marcas de carga, almohadillas y estructuras de escape de fluidos. Definen cuatro

eventos sísmicos de magnitud moderada a alta, en cualquier caso siempre $M \geq 5$. Aunque en este trabajo Alfaro *et al.* (1997) las asignan al Plioceno, estudios más recientes permiten datarlas como Pleistoceno inferior (Gilbert *et al.*, 2005). En relación con estas sismitas, Gilbert *et al.* (2005) estudian un paleodeslizamiento en depósitos deltaicos de la misma edad, que interpretan como paleoterrorismos.

- **Tsunamis del Golfo de Cádiz:** Luque *et al.* (2001) y Luque (2002) localizan en el Golfo de Cádiz y en el Parque Nacional de Doñana los sedimentos generados por el tsunami del terremoto de Lisboa de primero de noviembre de 1755. Este dato no aporta en sí mismo una información adicional al hecho de la identificación de nuevos eventos sísmicos, pero sí al compararlo con eventos previos, como es el tsunami que identifican y datan en el 216-218 B.C. Este evento es de características similares al de Lisboa de 1755, por lo que le atribuyen una magnitud similar y dan la posibilidad de que haya sido la misma fuente sismogénica la responsable del terremoto. Además, indican que en esta zona podrían repetirse eventos de este tipo aproximadamente cada 2.000 años.

Paleosismicidad de la Cordillera Costero-Catalana

Las fallas identificadas como activas en esta cordillera son de carácter normal y paralelas a la cadena (Fallas del Bajo Ebro, Camp y Montseny) o con dirección NO-SE (Falla de Amer). También se han podido recopilar datos de sismitas cuaternarias asociadas a la actividad de estas fallas (Fig. 3):

- **Cuenca del Bajo Ebro y la Falla del Camp:** Masana (1996a y 1996b) describió sismitas en el Morro del Gos, San Onofre (Cuenca del Bajo Ebro) y en el segmento sur de la Falla del Camp. Las estructuras mejor desarrolladas corresponden a las del Morro del Gos, en el que se generan dentro de una serie sedimentaria continental pleistocena de 27 m de potencia compuesta por: gravas no cementadas con alternancias de limos (10 m), conglomerados carbonáticos bien seleccionados (15 m), arenas eólicas (0,4 a 1 m), arenas costeras (0,6 a 1 m) y una terraza marina de arenas (0,25 m). Las principales estructuras son diques de limos y arenas que pueden intruir lateralmente formando filones capa (*sills*) y distorsión en la estratificación, generando estructuras en disco y pilares. También identificaron diques de gravas intruyendo en limos. Asociaron estas licuefacciones a la actividad de las fallas más cercanas, pero no indicaron

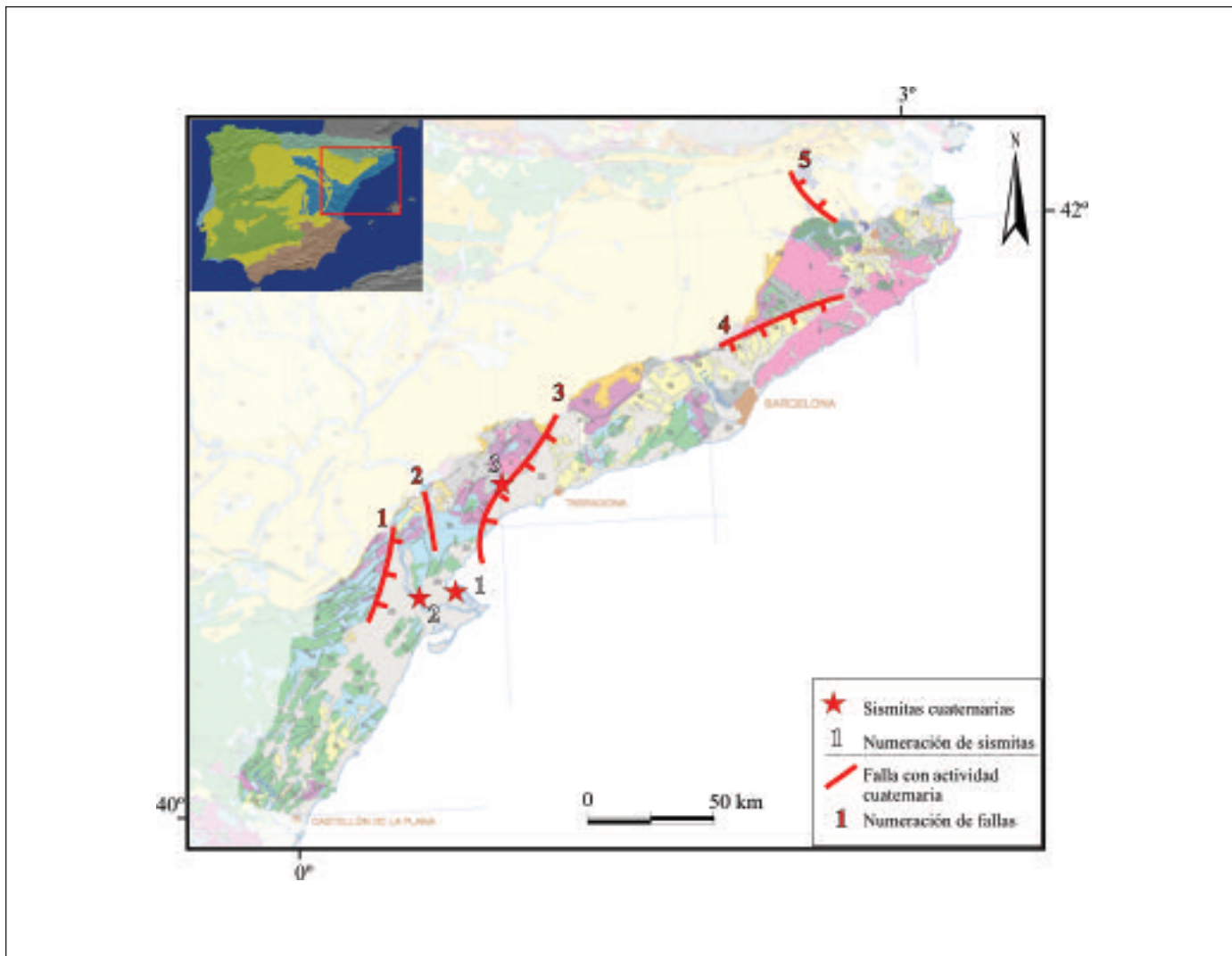


Fig. 3. Principales estudios de paleosismicidad en la Cordillera Costero-Catalana. Sismitas del Cuaternario: 1) Morro de Gos; 2) San Onofre; 3) El Camp. Fallas con actividad paleosísmica cuaternaria: 1) Bajo Ebro; 2) Plà del Burgar; 3) El Camp; 4) Montseny y 5) Amer. Mapa geológico base 1:2.000.000, IGME (2004)

Fig. 3. Location of the main paleosismological studies in the Catalanian Coastal Chain. Quaternary seismites: 1) Morro de Gos; 2) San Onofre; 3) El Camp. Faults with Quaternary seismic activity: 1) Bajo Ebro; 2) Plà del Burgar; 3) El Camp; 4) Montseny and 5) Amer. Geological base map: 1:2.000.000, IGME (2004)

magnitudes aproximadas. Sin embargo, el hecho de que se produzcan licuefacciones en arenas indica una $M \geq 5$ y en gravas de $M \geq 7,5$.

- **Fallas del Bajo Ebro, Camp y Montseny:** Masana (1996a y 1996b) estudia la actividad paleosísmica de estas tres fallas mediante facetas triangulares, encontrando más de una familia de facetas para las fallas de El Camp y Montseny, y una única familia para la del Bajo Ebro. Masana *et al.* (2001b) indican también la actividad reciente de la falla del Plà del Burgar, de dirección NO-SE y situada entre las Fallas del Bajo Ebro y del Camp. Santanach y Masana (1999) deducen movimientos

pliocuaternarios de encajamiento de la red fluvial y levantamiento y hundimiento de bloques debido al movimiento de estas tres fallas.

Masana *et al.* (2000), Atakan *et al.* (2000) y Santanach *et al.* (2001) realizaron un estudio a fondo de la Falla del Camp, en el que realizan varias trincheras y dataciones de eventos, calculando el inicio de la actividad sísmica de esta falla desde al menos 125.000 años. Utilizaron diferentes métodos de datación geocronológica con el fin de contrastar la solución: correlación geomorfológica con fenómenos globales (cambios del nivel del mar y paleomagnetismo), desequili-

brios de las series de uranio, termoluminiscencia, radiocarbono y palinología. Dividieron la falla en un segmento norte de 16 km de longitud (con actividad desde hace 140.000 años y una tasa de movimiento de 0,03-0,1 mm/año) y un segmento sur de 14 km de longitud en la superficie emergida y 10 km bajo el nivel del mar (activa desde hace 125.000 años y con tasa de movimiento de 0,02-0,08 mm/año). La investigación la centraron en el segmento sur, en el que identificaron 3 eventos seguros. El evento más reciente tiene entre 1.195 y 30.000 años (con muy pocas probabilidades de ser anterior a 15.000 años), y un deslizamiento vertical entre 0,7 y 1 m. El siguiente tiene entorno a 35.000 años, con una componente vertical de 0,4 m. El más antiguo tiene unos 50.000 años y el deslizamiento generado por este evento está entre los 1,4 y los 2 m. Los autores calcularon el intervalo de recurrencia de esta falla y estimaron que es de 30.000 años para magnitudes de 6,7 ($\pm 0,5$).

Villamarín *et al.* (1999 y 2000) dataron los abanicos aluviales procedentes del escarpe de la Falla del Camp, diferenciando en esta falla 3 etapas de movimiento que corresponden a los intervalos temporales correspondientes a 300.000, 125.000 y 10.000 años.

- **Falla de Amer:** falla normal-direccional situada en la zona NO de la Cordillera Costero-Catalana, con 30 km de longitud y dirección NO-SE. A esta falla se le atribuye la crisis sísmica de 1427, en la que se produjeron terremotos de intensidades entre VII y VIII. Esta falla fue estudiada desde un punto de vista paleosísmico por Ferrer *et al.* (1999) y por Fleta *et al.* (2000). En el primer trabajo se estudió la actividad de esta falla analizando las facetas triangulares asociadas. La datación geomorfológica de las facetas triangulares indica una actividad pliocuaternaria.

Ferrer *et al.* (1999) ampliaron el estudio geomorfológico y realizaron estudios geofísicos (de resistividades y tomografía sísmica) para acotar correctamente el plano de falla para poder realizar trincheras en un futuro, pero no dataron ningún evento. También realizaron estudios de tasas de sedimentación en lagos cuaternarios, deduciendo actividad sísmica en los últimos 4.000 años. La tasa de movimiento calculada mediante segmentación de la falla es de 0,125-0,05 mm/año y entre 2 a 5 veces superior si se utiliza la tasa de sedimentación en lagos. También calcularon el desplazamiento medio por evento, estando comprendido entre 0,5 y 1 m de salto de falla, con un intervalo de recurrencia de 4.000 a 20.000 años.

Paleosismicidad de la Cuenca del Tajo y Campo de Calatrava

- **Cuenca del Tajo:** en esta cuenca podemos encontrar eventos paleosísmicos en los valles de los ríos Tajo, Jarama y Manzanares (Fig. 4).

Los afloramientos del valle del Tajo se encuentran entre las localidades alcarreñas de Sacedón y Trillo y corresponden a licuefacciones en arenas (diques) y microfracturación (Giner, 1996; Giner *et al.*, 1996, De Vicente *et al.*, 1996). La edad que asignan a estos materiales (terrazas fluviales) es Pleistoceno inferior-medio y la $M \geq 5$.

Las terrazas del Jarama son las que presentan mayor número de afloramientos paleosísmicos de la Cuenca del Tajo. Silva *et al.* (1988 y 1989a) determinan mediante el estudio de índices geomorfológicos un período de mayor actividad neotectónica en el valle del Jarama para el Pleistoceno inferior-medio. Torres *et al.* (1995) determinaron dos períodos de actividad neotectónica en el Pleistoceno inferior y otro a finales del Pleistoceno medio, mediante la evolución del sistema fluvial Jarama-Lozoya-Guadalix, con evidencias paleosismológicas (deslizamientos) para el primer período. Giner (1996) y Giner *et al.* (1996) localizaron en la terraza del Jarama Arganda I (mitad del Pleistoceno medio) volcanes de arena relacionados con fallas normales ($M \geq 5$). Estos últimos autores y De Vicente *et al.* (1996) dedujeron de datos paleosísmicos que la principal actividad sísmica y neotectónica de la Cuenca del Tajo se produjo durante el Pleistoceno inferior-medio.

Silva *et al.* (1997b) describieron estructuras de licuefacción con desarrollo tridimensional en las terrazas del Pleistoceno medio del río Manzanares (Vallecas, Madrid). Identificaron estructuras como volcanes de lodo, domos y fisuras desarrollados sobre una antigua llanura de inundación del río Manzanares, a las que asignan una $M \geq 5$.

- **Campo de Calatrava:** las únicas estructuras localizadas hasta el momento en los materiales volcanosedimentarios de Campo de Calatrava corresponden al anillo de tobas del Cuaternario del maar de Granátula de Calatrava (Rodríguez Pascua y Barrera, 2002). Las estructuras identificadas son estructuras en almohadilla, en champiñón, intrusiones y colapsos. Todas ellas fueron generadas por procesos de licuefacción en microconglomerados que intruyen en arenas y limos que actúan como capas confinantes. Esto implica que la magnitud sísmica necesaria para licuefactar gravas fue superior a 7,5.

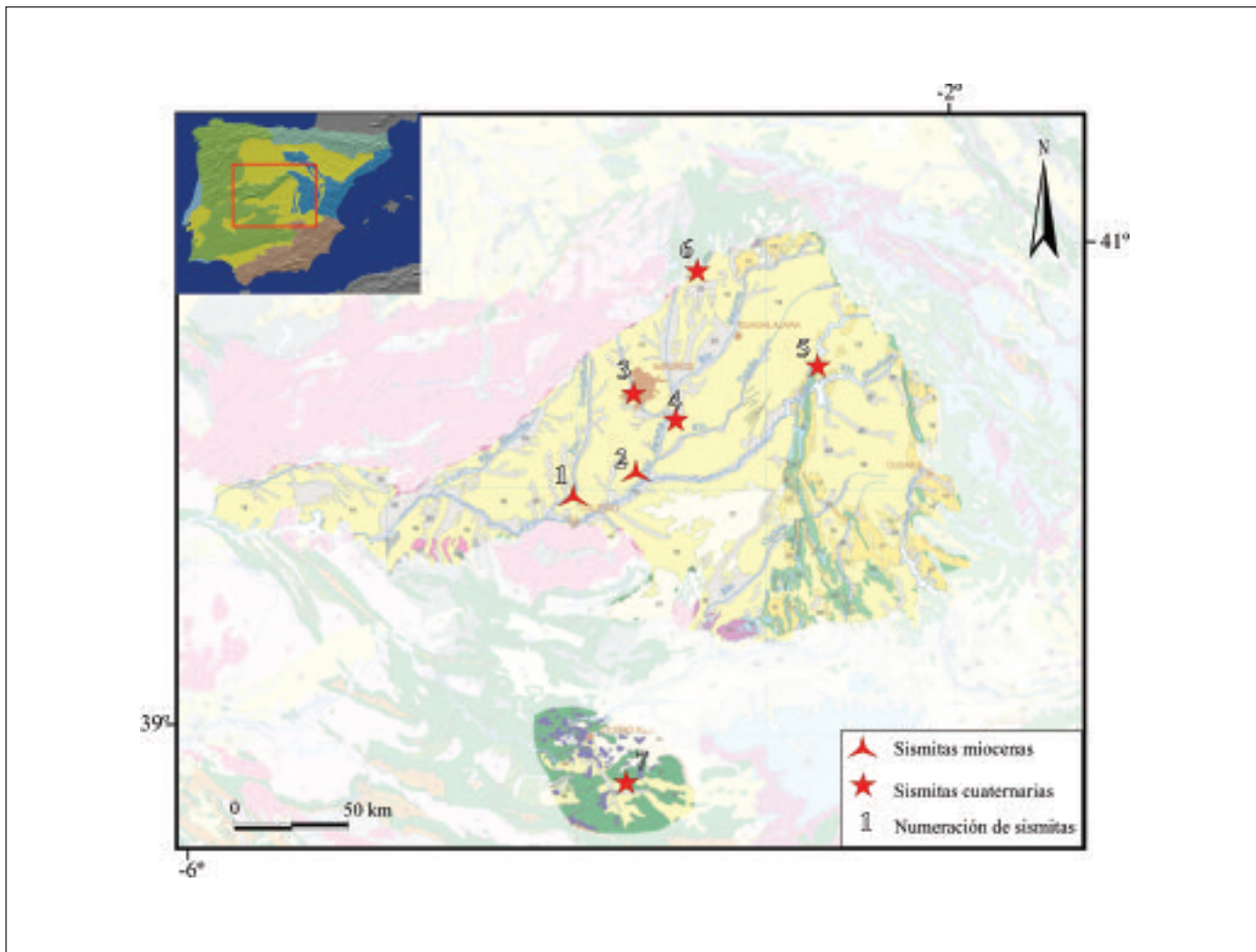


Fig. 4. Situación de los principales estudios de paleosismicidad en la Cuenca del Tajo. Sismitas del Mioceno: 1) Villaluenga and 2) Añover. Sismitas del Cuaternario: 3) Vallecas; 4) Arganda; 5) Trillo; y 6) Jarama-Lozoya-Guadalix. Campo de Calatrava, sismitas del Mioceno: 7) Granátula de Calatrava. Mapa geológico base 1:2.000.000, IGME (2004)

Fig. 4. Location of the main paleosismological studies in the Tajo Basin. Miocene Seismites: 1) Villaluenga y 2) Añover. Quaternary seismites: 3) Vallecas; 4) Arganda; 5) Trillo; and 6) Jarama-Lozoya-Guadalix. Campo de Calatrava, Miocene seismites: 7) Granátula de Calatrava. Geological base map: 1:2.000.000, IGME (2004)

Paleosismicidad en los Pirineos

La investigación paleosísmica en los Pirineos se inicia con el trabajo de Ortuño *et al.* (2004), en el que aportan las primeras pruebas geomorfológicas de la actividad de la falla del norte de la Maladeta, dándola como posible fuente sismogénica del terremoto de Vielha (11 de noviembre de 1923).

Rodríguez Pascua y Perucha (2005) identificaron las primeras sismitas en materiales glaciolacustres en los Pirineos, dentro de la Cuenca de Tirvia (Lleida). Establecieron una diferenciación entre estructuras de deformación de origen glaciar, sedimentarias, generadas por gradientes inversos de densidad, y sismi-

tas. Estas últimas corresponden fundamentalmente a *fault graded beds* en los que se puede observar por primera vez su estructura tridimensional, que indica un control estructural de las mismas. Identifican tres niveles con sismitas dentro de la columna estratigráfica de la cuenca. Todas las sismitas tienen fenómenos de licuefacción, que indicarían $M \geq 5$.

Paleosismicidad en la Cordillera Ibérica

El único trabajo realizado hasta el momento es el de Simón *et al.* (2005) en la falla de Conclud, situada en el borde NE de la fosa del Jiloca, con 13 km de longi-

tud y 60 a 120 m de escarpe de falla. Estos autores concluyeron que esta falla ha sido activa durante la mayor parte del Plioceno superior y Cuaternario, con tasas medias de movimiento desde el final del Ruscinense (3,6 Ma; salto: 250 m) de 0,07 mm/año y de 0,23-0,58 mm/año desde el Pleistoceno (169-116 ka; salto: 39-68 m). El período de recurrencia que obtuvieron mediante relaciones empíricas de la relación de la falla con respecto a la tasa de movimiento es de 1,3 a 16,2 ka y un desplazamiento cosísmico de 0,8 a 1,1 m.

Conclusiones

Los datos paleosísmicos existentes en la Península Ibérica se concentran fundamentalmente y por este orden en la Cordillera Bética, Cadena Costero-Catalana y Cuenca del Tajo.

Las principales fallas activas en la Cadena Bética tienen una orientación NE-SO y son desgarres con componente inversa, con desgarres perpendiculares y componente normal, y fallas normales E-O. Las tasas de deslizamiento son bajas. En fallas como la de Lorca-Totana oscilan entre 0,07-0,66 mm/año. Las sismitas corresponden a estructuras de licuefacción que marcan $M \geq 5$, repartidas a lo largo de la cadena.

La Cordillera Costero-Catalana presenta fallas activas paralelas a la estructura general de la cadena, fundamentalmente de carácter normal y fallas normal-direccionales NO-SE. Las tasas de deslizamiento varían entre 0,03-0,1 mm/año de la Falla del Camp y 0,05-0,25 mm/año de la Falla de Amer. También hay estructuras de licuefacción, pero concentradas en la zona sur, con $M \geq 5$.

En la Cuenca del Tajo se han identificado paleosismos cuaternarios mediante sismitas que indican una actividad sísmica de moderada a alta ($M \geq 5$) en una zona que históricamente se había considerado estable.

Todos estos datos suponen el inicio del estudio de la paleosismología en España; se trata de datos muy valiosos para identificar terremotos anteriores a las primeras crónicas históricas, las cuales resultan claramente insuficientes en estos momentos. Por lo tanto se debería ampliar la investigación en este campo para poder completar el registro sísmico existente hasta el momento y tener una idea más real del fenómeno sísmico en la Península Ibérica.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto PRIOR (*Determinación de las Fallas de Primer Orden*

mediante análisis integrado de datos geológicos), financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear y ENRESA. También agradecer los comentarios y aportaciones realizadas por Enrique Díaz-Martínez y Pedro Alfaro, revisores de este trabajo.

Referencias

- Alfaro, P. y Soria, J.M. 1996. Nuevos ejemplos de sismitas messinienses en San Miguel de Salinas (Alicante), Cordillera Bética Oriental. *II Congreso del Grupo Español del Terciario. Comunicaciones*, 15-18.
- Alfaro, P., Domènech, C., Estévez, A. y Soria, J.M. 1995. Estructuras de deformación en sedimentos del Cuaternario reciente de la cuenca del bajo Segura (Alicante). Discusión sobre su posible origen sísmico. *Geogaceta*, 17, 91-94.
- Alfaro, P., Moretti, M. and Soria, J.M. 1997. Soft-sediment deformation structures induced by earthquakes (sismites) in the pliocene lacustrine deposits (Guadix-Baza Basin, Central Betic Cordillera). *Eclogae Geologicae Helveticae*, 90, 531-540.
- Alfaro, P., Estévez, A., Moretti, M. y Soria, J.M. 1999. Structures sédimentaires de déformation interprétées comme séismites dans le Quaternaire du bassin du Bas Segura (Cordillère bétique orientale). *Académie des Sciences*, Elsevier, Paris. 328, 17-22.
- Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A. and López-Casado, C. 2001a. Paleoliquefaction in the Bajo Segura Basin (eastern Betic Cordillera). *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 233-244.
- Alfaro, P., Galindo-Zaldívar, J., Jabaloy, A., López-Garrido, A.C. and Sanz de Galdeano, C. 2001b. Evidence for the activity and paleoseismicity for the Paul Fault (Betic Cordillera, Southern Spain). *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 283-296.
- Alfaro, P., Delgado, J., Estévez, A., Molina, J.M., Moretti, M. and Soria, J.M. 2002. Liquefaction and fluidization structures in Messinian storm deposits (Bajo Segura Basin, Betic Cordillera, Southern Spain). *International Journal of Earth Sciences*, 91, 505-513.
- Atakan, K., Santanach, P. and Masana, E. 2000. On the reliability of paleoseismic data: El Camp Fault (northeastern Iberian Peninsula). *HAN2000*, 13-17.
- Bustillo Revuelta, M.A. y Martín Escorza, C. 1984. Estructuras primarias de deformación en rocas opalinas del Mioceno Medio (Toledo). *I Congreso Español de Geología*, 1, 159-171.
- Calvo, J.P., Rodríguez Pascua, M.A., Martín Velázquez, S., Jiménez, S. and De Vicente, G. 1998. Microdeformation of lacustrine laminite sequences. An interpretation of loop-bedding. *Sedimentology*, 45, 279-292.
- Clauss, F.L. 1993. Estructuras indicadoras de paleosismicidad en el Neógeno de Palos de la Frontera (SO de la depresión del Guadalquivir). *Boletín Geológico y Minero*, 104 (6), 613-620.
- De Vicente, G., Giner, J.L., Muñoz Martín, A., González Casado, J.M. and Lindo, R. 1996. Determination of pre-

- sent day stress tenson and neotectonic intervian in the Spanish Central System and Madrid Basin, Central Spain. *Tectonophysics*, 266 (1-4), 405-424.
- Estévez, A., Soria, J.M. y Alfaro, P. 1993. Structures sédimentaires liées à paléoséismicité dans le Messinien d'Alicante (Cordillère Bétique Orientale, Espagne). 14th Regional Meeting of Sedimentology IAS, Marrakesh (Marruecos). *Abstracts*, p.375.
- Estévez, A., Soria, J.M. y Alfaro, P. 1994. Un nouveau type de séismites dans le Miocène supérieur d'Alicante (Cordillère Bétique Orientale, Espagne) : les coins détritiques. *Comptes Rendues de l'Académie de Sciences de Paris*, 318 (2), 507-512.
- Ferrer, P., Masana, E., y Santanach, P. 1999. Expresión geomorfológica de la falla de Amer (NE de la Península Ibérica). *Acta Geológica Hispánica*, 31 (3-4), 17-24.
- Fleta, J., Santanach, P., Martínez, P., Goula, X., Grellet, B. and Masana, E. 2000. Geologic, geomorfológic and geophysic approaches for the paleoseismological analysis of the Amer fault (NE Spain). *HAN 2000*, 63-66.
- García del Cura, M.A., Ordoñez, S. y Calvo, J.P. 1979. Estudio sedimentológico de la cuenca cuaternaria de Cordovilla (Provincia de Albacete). *Actas de la III Reunión Nacional del Grupo Español de Trabajo del Cuaternario*, CSIC, 247-257.
- Gilbert, L., Sanz de Galdeano, C., Alfaro, P., Scott, G. y López Garrido, A.C. 2005. Seismic-induced slump in Early Pleistocene deltaic deposits of the Baza Basin (SE Spain). *Sedimentary Geology*. (In press).
- Giner, J.L. 1996. *Análisis sismotectónico y neotectónico en el sector centro-oriental de la Cuenca del Tajo*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid: 268 p.
- Giner, J.L., De Vicente, G., Pérez González, A., Sánchez Cabañero, J., y Pinilla, L. 1996. Crisis tectónicas cuaternarias en la Cuenca de Madrid. *Geogaceta*. 20(4), 842-845.
- Hernández-Henrile, J.L., Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., y Santanach, P. 2000. Resultados preliminares del estudio paleosísmico mediante trincheras de la falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética). *Geotemas*, 1 (4), 335-339.
- Herraiz, M., De Vicente, G., Lindo, R., Giner, J., Simón, J.L., González Casado, J.M., Vadillo, O., Rodríguez-Pascua, M.A., Cicuéndez, J.I., Casas, A., Cabañas, L., Rincón, P., Cortés, A.L., Ramírez, M. and Lucini, M. 2000. The recent (Upper Miocene to Quaternary) and present tectonic stress distributions in the Iberian Peninsula. *Tectonics*, 19, 4, 762-786.
- IGME. 2004. Mapa Geológico de España. Escala 1: 2.000.000.
- Luque, L. 2002. *Cambios paleoambientales costeros en el sur de la Península Ibérica (España) durante el Holoceno*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 343 p.
- Luque, L., Lario, J., Goy, J.L., Dabrio, C.J. and Silva, P. G. 2001. Tsunami deposits as paleoseismic indicators: examples from the spanish coast. *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 197-212.
- Martínez-Díaz, J.J. 1998. Neotectónica y tectónica activa del sector centrooccidental de Murcia y Sur de Almería, Cordillera Bética (España). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 290 p.
- Martínez-Díaz, J.J. y Hernández-Henrile, J.L. 1999. Segmentación tectónica de la falla de Alhama de Murcia y actividad paleosísmica asociada. Contribución a la determinación de la peligrosidad sísmica en la región de Murcia. *1er Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, 75-87.
- Martínez-Díaz, J.J. and Hernández-Henrile, J.L. 2001a. Using travertine deformations to characterize paleoseismic activity along an active oblique-slip fault: the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera, Spain). *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 297-314.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Henrile, J.L., and Santanach, P. 2001b. Evidence for the coseismic events of recurrent prehistoric deformation along the Alhama de Murcia Fault, southeastern Spain. *Acta Geológica Hispánica*, 36 (3-4), 315-328.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., Hernández-Enrile, J.L. Santanach, P. 2003. Effects of repeated paleoearthquakes on the Alhama de Murcia Fault (Betic Cordillera, Spain) on the Quaternary evolution of an alluvial fan system. *Annals of Geophysics*, 46 (5), 775-793.
- Masana, E. 1996a. Neotectonic features of the Catalan Coastal Ranges, Northeastern Spain. *Acta Geologica Hispanica*, 29 (2-4), 107-121.
- Masana, E. 1996b. Evidences for past earthquakes in an area of low historical seismicity: The Catalan coastal ranges, NE Spain. *Annali di Geofísica*, 39, 689-704.
- Masana, E., Villamarín, J.A., Sánchez Cabañero, J., Plaza, J. and Santanach, P. 2000. Paleoseismological behavior of a fault with no historical seismicity: El Camp Fault (northeastern Iberian Peninsula). *HAN2000*, 101-104.
- Masana, E., Santanach, P., Martínez-Díaz, J.J., and Hernández-Henrile, J.L., 2001a. Evidence of recurrent pre-historic seismicity along the Lorca-Totana sector of the Alhama de Murcia Fault (Southeastern Spain). *Abstracts EUG Strasbourg*.
- Masana, E., Villamarín, J.A. and Santanach, P. 2001b. Paleoseismic results from multiple trenching analysis along a silent fault: the El Camp Fault (Tarragona, northeastern Iberian Peninsula). *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 329-354.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., and Hernández-Enrile, J.L. 2004a. The Alhama de Murcia Fault (SE Spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismogenic implications for the Ibero-Magrebian region. *Journal of Geophysical Research*, 109, 1-17.
- Masana, E., Perea, H., Ortuño, M., Martínez-Díaz, J.J., y Santanach, P. 2004b. Dislocaciones históricas en la terminación suroccidental de la falla de Alhama de Murcia. Primeros resultados del estudio paleosísmico. *GeoTemas*, 6(3), 167-170.
- Mc Calpin, J.P. and Nelson, A.R. 1996. Introduction to paleoseismology. In: *Paleosesimology*. Academic Press. 1-28.
- Montenat, C. 1980. Relation entre déformations synsédimentaires et paléoséismicité dans le Messinien de San Miguel de Salinas (Cordillères bétiques orientales, Espagne). *Bulletin de la Société géologique de France*, 22 (3), 501-509.
- Ortuño, M., Perea, H., Masana, E., y Santanach, P. 2004. La falla del norte de la Maladeta, ¿fuente sísmica del terre-

- moto de Vielha (11 de noviembre de 1923)? *Geo-Temas*, 6(3), 171-174.
- Reicherter, K.R. 2001. Paleoseismologic avances in the Granada Basin (Betic Cordilleras, Southern Spain). *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 267-282.
- Rodríguez Fernández, J. y Vera, J.A. 1986. Estratificaciones cruzadas deformadas de edad Tortonense: interpretación genética (Cordilleras Béticas). *Actas del IX Congreso Nacional de Sedimentología*, 1, 373-390.
- Rodríguez Pascua, M.A. 2001. *Paleosismicidad y sismotectónica de las cuencas neógenas lacustres del Prebético de Albacete*. Instituto de Estudios Albacetenses, 285p.
- Rodríguez Pascua, M.A., y Barrera, J.L. 2002. Estructuras paleosísmicas en depósitos hidromagmáticos del vulcanismo neógeno del Campo de Calatrava, Ciudad Real (España). *Geogaceta*, 32, 41-44.
- Rodríguez Pascua, M.A., De Vicente, G. y Calvo, J.P. 2000a. Similitudes entre la actividad sísmica actual y la paleosismicidad durante el Mioceno superior en las béticas externas: restricciones a partir del parámetro "b". *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (3-4), 505-518.
- Rodríguez Pascua, M.A., Calvo, J.P., De Vicente, G. and Gómez Gras, D. 2000b. Soft-sediment deformation structures interpreted as seismites in lacustrine sediments of the Prebetic Zone, SE Spain, and their potential use as indicators of earthquake magnitudes during the Late Miocene. *Sedimentary Geology*, 135, 117-35.
- Rodríguez Pascua, M.A., De Vicente, G. and Calvo, J.P. 2001. Paleoseismological analysis from the upper miocene lacustrine sediments in the Prebetic Zone, SE Spain. *Acta Geologica Hispanica*, 36 (3-4), 213-232.
- Rodríguez-Pascua, M.A., De Vicente, G., Calvo, J.P. and Pérez-López, R. 2003. Similarities between recent seismic activity and paleoseismites during the Late Miocene in the External Betic Chain: Relationship by "b" value and fractal dimension. *Journal of Structural Geology*, 25, 749-763.
- Rodríguez Pascua, M.A. y Perucha, M.A. 2005. Neotectonic and paleoseismic evidences in Quaternary glacio-lake sediments in the Tirvia Basin (East Perenees, Lleida, Spain). *Abstracts, Volume of the Sixth International Conference on Geomorphology*. 296.
- Rodríguez Pascua, M.A., Pérez López, R. y Calvo, J.P. 2005. Morphological evidences of superficial ruptures affecting Plio-Quaternary lacustrine sediments (Tobarra, Albacete, SE of Spain) and generated by earthquakes with magnitudes greater than 5.5. *Abstracts Volume of the Sixth International Conference on Geomorphology*. 272.
- Santanach, P., y Masana, E. 1999. Paleoseismicity in a low seismicity area: The case of Spain. *Proceedings of the 2nd EU-Japan workshop on seismic risk*, 36-47.
- Santanach, P., Masana, E. y Villamarín, J.A. 2001. *Proyecto Datación*. Consejo de Seguridad Nuclear, ed., 159 p.
- Seilacher, A. 1969. Fault graded beds interpreted as seismites. *Sedimentology*, 13. 155-159.
- Silva, P., Goy, J. y Zazo, C. 1988. Neotectónica del sector centro-meridional de la Cuenca de Madrid. *Estudios Geológicos*, 44, 415-427.
- Silva, P., Goy, J. y Zazo, C. 1989a. Evolución geomorfológica de la confluencia de los ríos Jarama y Tajuña durante el Cuaternario (Cuenca de Madrid. España). *Cuaternario y Geomorfología*. 3, 320-336.
- Silva, P., Mather, A.E., Goy, J., Zazo, C. y Harvey, M.A. 1989b. Controles en el desarrollo y evolución del drenaje en zonas tectónicamente activas: el caso del río Mula (Región de Murcia, SE España). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9 (3-4), 269-284.
- Silva, P., Goy, J., Zazo, C. Lario, J. and Bardají, T. 1997a. Paleoseismic indicators along "aseismic" fault segments in the Guadalentín Depression (SE Spain). *Journal of Geodinamics*. 24 (1-4), 105-115.
- Silva, P., Cañaveras, J.C., Sánchez-Moral, S., Lario, J. and Sanz, E. 1997b. 3D soft-sediment deformation structures: evidence for Quaternary seismicity in the Madrid Basin, Spain. *Terra Nova*, 9, 208-212.
- Silva, P., González-Hernández F.M., Goy, J., Zazo, C. and Mörner, N.A. 1999. Quaternary reverse surface faulting in Mallorca Island (Balears, Spain): Relationships with historical seismicity. *Geogaceta*, 26, 99-102.
- Simón, J.L., Lafuente, P., Arlegui, L.E., Liesa, C.L. y Soriano, M.A. 2005. Caracterización paleosísmica preliminar de la falla de Conclud (fosa del Jiloca, Teruel). *Geogaceta*. (En prensa).
- Soler, R., Masana, E., y Santanach, P. 2003. Evidencias geomorfológicas y estructurales del levantamiento tectónico reciente en la terminación sudoccidental de la Falla de Alhama de Murcia (Cordillera Bética Oriental). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 16 (3-4), 123-133.
- Taboada, A., Bousquet, J.C., Philip H. 1993. Coseismic elastic models of folds above blind thrusts in the Betic Cordilleras (Spain) and evaluation of seismic hazard. *Tectonophysics*, 220, 223-241.
- Torres, T., Cobo, R., García Alonso, P., Grün, R., Hoyos, M., Juliá, R., Llamas, J. y Soler, V. 1995. Evolución del sistema fluvial Jarama-Lozoya-Guadalupe durante el Plioceno final y el Cuaternario. *Geogaceta*, 17, 46-48.
- Villamarín, J.A., Masana, E., Calderón, T., Juliá, R. y Santanach, P. 1999. Abanicos aluviales cuaternarios del Baix Camp (Provincia de Tarragona): resultados de dataciones radiométricas. *Geogaceta*, 25, 211-214.
- Villamarín, J.A., Masana, E., Sánchez Cabañero, J., Plaza, J. y Santanach, P. 2000. Comportamiento sismogénico de una falla sin sismicidad histórica: la Falla de El Camp (noroeste de la Península Ibérica). *Geo-Temas*, 1(4), 365-369.
- Wells, D.L. y Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulleting of the Seismological Society of America*, 84 (4), 974-1002.

Recibido: junio 2005.

Aceptado: septiembre 2005.