

# Velocidad de desplazamiento de la falla de Alhama de Murcia calculada mediante técnicas paleosismológicas y morfotectónicas

## *Alhama de Murcia slip rate based on paleoseismology and a morphotectonic analysis*

M. Ferrater<sup>1</sup>, M. Ortuño<sup>1</sup>, E. Masana<sup>1</sup>, J.J. Martínez-Díaz<sup>2</sup>, R. Pallàs<sup>1</sup>, A. Medialdea<sup>3</sup>, H. Perea<sup>4</sup>, S. Baize<sup>5</sup>, E. García-Meléndez<sup>6</sup>, A. Echeverría<sup>1</sup>, T. Rockwell<sup>7</sup>, W.D. Sharp<sup>8</sup>, E. Rhodes<sup>3</sup> y R. Arrowsmith<sup>9</sup>

1 RISKNAT. GEOMODELS. Dept. Geodinàmica i Geofísica, Fac. Geologia, Univ. de Barcelona, 08028 Barcelona, Spain. marta.ferrater@ub.edu

2 Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense, Instituto de Geociencias IGEO (UCM, CSIC), 28040 Madrid, Spain

3 Department of Geography, University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK

4 Barcelona Center for Subsurface Imaging (B-CSI), Dept. de Geociències Marines - Institut de Ciències del Mar - CSIC, 08003 Barcelona, Spain

5 Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire - Seismic Hazard Division (BERSSIN), BP 17, 92262 Fontenay-aux-Roses, France

6 Área de Geodinámica Externa, Facultad de CC. Ambientales, Universidad de León, Campus de Vegazana s/n 24071 León, Spain

7 Department of Geological Sciences, San Diego State University, San Diego, CA 92182, USA

8 Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA 94709, USA

9 School of Earth and Space Exploration, Arizona State University, Tempe, AZ 85287-6004, USA

**Resumen:** Se calcula la velocidad de desplazamiento de la falla de Alhama de Murcia mediante la aplicación de dos técnicas: a) la paleosismología y b) el análisis morfotectónico. Estas metodologías basan el cálculo en la velocidad en la dislocación tectónica de un elemento lineal de edad conocida. Se han excavado trincheras 3D en el segmento Lorca-Totana con el fin de identificar y medir la dislocación de un paleocanal enterrado. La edad del canal ha sido delimitada gracias a dataciones de OSL, radiocarbono y series del uranio aplicadas a pequeñas cantidades de carbonato pedogénico. La velocidad total obtenida es 0.9 mm/a. En la terminación sur de la falla (segmento Goñar-Lorca) se han analizado ocho canales dislocados en superficie. Las edades máximas de estos canales (edad de la superficie en la que se encajan) se han aproximado gracias a dataciones publicadas basadas en la termoluminiscencia, junto con nuevas dataciones de carbonato pedogénico. La velocidad lateral mínima obtenida con esta metodología es de 1.7-1.6 mm/a. Estos valores, coincidentes con los de las trincheras 3D y mayores a los obtenidos hasta la fecha, reafirman la falla de Alhama de Murcia como una de las más activas de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales.

**Palabras clave:** tectónica activa, geomorfología tectónica, trincheras paleosísmicas, falla de salto lateral.

**Abstract:** We calculated the slip rate of the Alhama de Murcia fault by means of two techniques: a) paleoseismology, and b) a morphotectonic analysis. These methodologies measure the offset of a linear feature whose age is known. In the Lorca-Totana segment of the fault, we carried out a three-dimensional trenching campaign to identify and measure the offset of a buried paleochannel. The age of the paleochannel was constrained by new approaches of OSL, radiocarbon and U-series applied to small amounts of pedogenic carbonate datings. The mean net slip rate obtained is 0.9 mm/a. In the southernmost termination of the fault (Goñar-Lorca segment), we analysed eight offset channels in surface. The maximum ages of the channels (age of the surface in which they are entrenched) were estimated in base of previous geomorphological maps and of published ages (thermoluminescence) together with new datings of pedogenic carbonate. The minimum lateral slip rate for the fault in this area is 1.7-1.6 mm/a. These slip rate values position the Alhama de Murcia fault as one of the most active faults in the Eastern Betics Shear Zone.

**Key words:** active tectonics, tectonic geomorphology; paleoseismic trenches, strike-slip fault

## INTRODUCCIÓN

La peligrosidad de una falla activa se determina gracias al cálculo de los parámetros sísmicos de ésta, entre ellos la velocidad de desplazamiento. Este parámetro para fallas de salto en dirección se obtiene midiendo el desplazamiento acumulado por un elemento lineal, normalmente un canal, cuya edad es conocida. En general existen dos técnicas extensamente aplicadas con este fin: a) la paleosismología y b) el análisis morfotectónico. La principal limitación de ambas técnicas es la preservación de evidencias de

salto, es decir, de los elementos dislocados. En fallas lentas, la disponibilidad de los elementos lineales es escasa debido a que a) los procesos erosivos tienden a borrarlos, y/o b) son destruidos por la acción humana. Es por estos dos motivos que, en fallas lentas, los investigadores se ven obligados a integrar cuanta información esté a su alcance.

La falla de Alhama de Murcia (FAM) es una falla lenta del SE de la Península Ibérica (Fig. 1) cuya velocidad de desplazamiento, directamente proporcional a su peligrosidad sísmica, no ha sido determinada con suficiente precisión (Masana et al.,

2004; Ortuño et al., 2012). La FAM forma parte de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO; Fig. 1), que absorbe parte de la convergencia entre las placas europea y africana. Es conocida por ser la responsable del terremoto de Lorca el día 11 de mayo del 2011 (Mw 5.2; López-Comino et al., 2012). La falla se divide en cuatro segmentos, dos de los cuales (Goñar-Lorca y Lorca-Totana) presentan mayor actividad cuaternaria (Fig. 1; referencias incluidas en Martínez-Díaz et al., 2012).

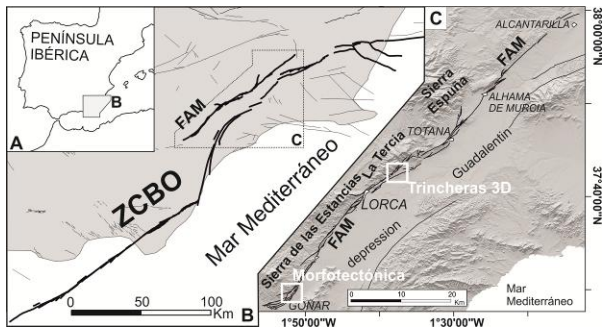


FIGURA 1. A) Península Ibérica; B) Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO); fallas que la conforman en negrita; C) mapa estructural y de los principales accidentes geográficos asociados a la falla de Alhama de Murcia.

En este artículo se presenta la velocidad de desplazamiento de la falla de Alhama de Murcia obtenida mediante la aplicación de las dos

metodologías anteriormente citadas. Para determinar la edad de los elementos dislocados, se utilizan las edades de termoluminiscencia de Ortuño et al. (2012) y nuevas dataciones adquiridas con radiocarbono, luminiscencia estimulada ópticamente (OSL) y series del uranio aplicadas a pequeñas cantidades de carbonato pedogénico.

### PALEOSISMOLOGÍA 3D

Se han excavado 10 trincheras en la rama sur de la FAM en el segmento de Lorca-Totana (concretamente en el abanico aluvial de El Saltador) con el fin de identificar un paleocanal enterrado que pueda servir para calcular la velocidad de desplazamiento de la falla (Fig. 2). La secuencia expuesta en las trincheras muestra una sedimentación aluvial con intercalación de unidades interpretadas como *debris* y *mud flows*. A techo, se encaja un sistema de canales en el que destaca la unidad D, ya que presenta unas características propias de canal más distintivas (facies, encajamiento, forma, etc.; Fig. 2). La correlación entre los dos segmentos del canal D en cada bloque de falla se ha realizado siguiendo un criterio estratigráfico y con las edades obtenidas con las series del uranio, que dan una edad mínima para el canal de  $11.0 \pm 1.7$  y  $12.39 \pm 0.42$  ka en el bloque NO y en el SE, respectivamente (Fig. 2). La edad del canal está comprendida entre la edad de las unidades B ( $15.5 \pm 1.0$  ka) y G (20839 – 23014 cal BP).

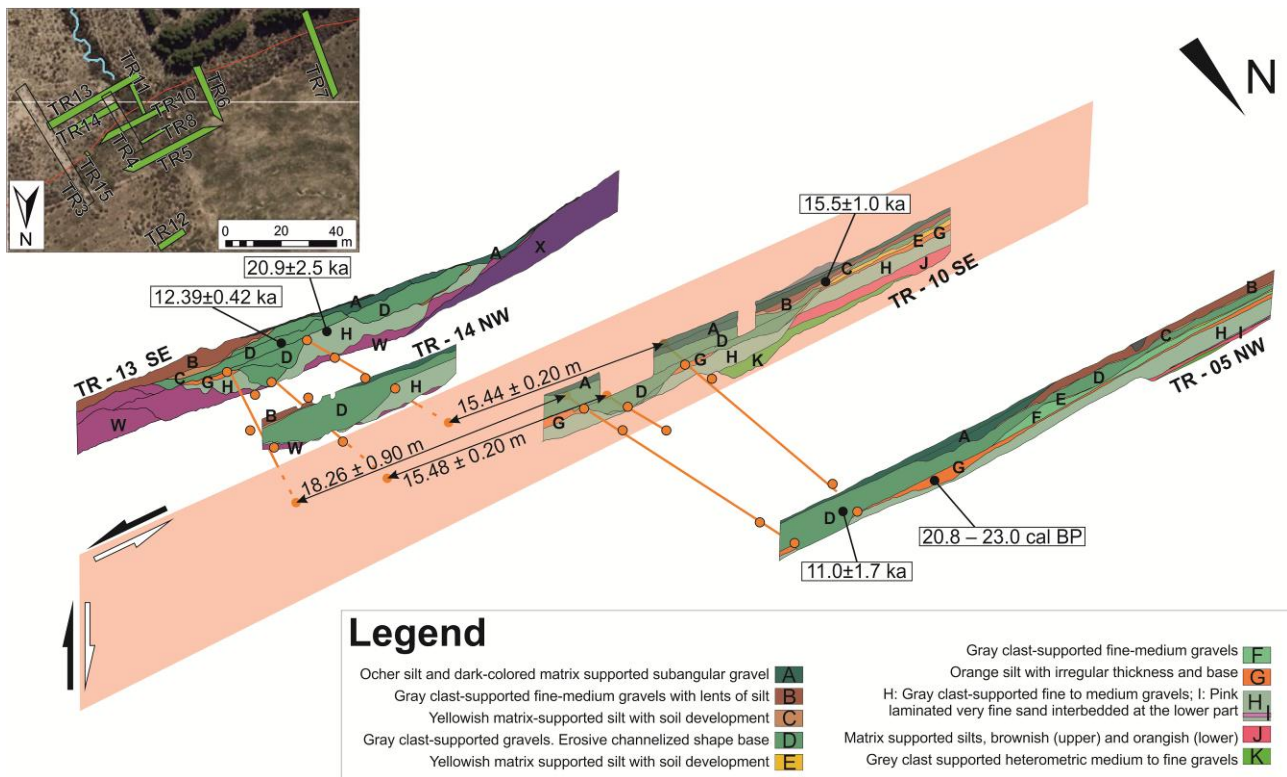


FIGURA 2. Desplazamiento del canal D medido en las trincheras de El Saltador. A) Mapa con la localización de las trincheras con respecto a la rama sur de la FAM; B) bloque diagrama con alguna de las trincheras (TR 5, 10, 13 y 14), la falla simplificada en un plano y la posición de las dataciones. Las líneas naranjas son las líneas rectas ajustadas tridimensionalmente, y los puntos naranjas son los puntos de referencia.

Para medir la dislocación del canal, primero se han identificado tres puntos de referencia del canal en cada pared de la trinchera (los dos márgenes y el depocentro). Para los puntos del depocentro identificados en el bloque NO de la falla, se ha ajustado una línea recta tridimensional, y se ha proyectado contra la falla (simplificada como un plano) para obtener un punto (*piercing point*). Se han repetido estos dos pasos en el otro bloque de la falla. La distancia entre los dos *piercing points* es el desplazamiento. Se han repetido estos pasos para cada uno de los márgenes del canal. Este método es útil para aquellos canales cuya forma pueda aproximarse a una línea recta. Aquí, la forma de los canales actuales en superficies es utilizada como análoga del paleocanal. Además, no es necesario calcular el gradiente del canal, puesto que está incluido en calcular su tendencia en 3D. La dislocación media del canal (usando las tres distancias obtenidas) se ha calculado con las funciones de probabilidad de Zechar y Frankel (2009).

La dislocación media del canal D es de  $16.4 +2.7/-0.3$  m, el componente lateral es  $16.3 +2.7/-0.3$  m y, el vertical,  $1.3 \pm 0.1$  m. La relación entre la dislocación lateral y la vertical sugiere que la rama sur de la FAM en el segmento Lorca-Totana tiene un desplazamiento principalmente lateral. Considerando la edad del canal, las velocidades total, lateral y vertical resultantes son  $0.9 \pm 0.1$  mm/a,  $0.9 \pm 0.1$  mm/a, y  $0.1 \pm 0.0$  mm/a, respectivamente.

## ANÁLISIS MORFOTECTÓNICO

Para calcular la velocidad de desplazamiento de la falla, se utilizaron ocho canales dislocados, previamente descritos y medidos por Ferrater et al. (2015), y se aproximaron sus edades (Tabla I). La edad máxima de los canales es la edad de la unidad aluvial en la que se encaja el canal. Las edades de los canales se han determinado directamente por la edad del abanico en el que se encuentran, y si no es posible, por el más cercano o por la edad general de la generación aluvial descrita por Ortuño et al. (2012). Este análisis se realizó en la terminación meridional del segmento Goñar-Lorca, donde la traza de la falla en superficie se ramifica en una estructura en forma de cola de caballo.

Las velocidades calculadas oscilan entre 0.4 y 2.4 mm/a (Tabla I). Para un buen análisis de estos valores, se necesita tener en cuenta a qué rama pertenece cada uno de ellos. En aquellos casos donde hay más de un valor de velocidad para la misma rama, se calcula la intersección entre los valores para obtener la velocidad de la rama (Fig. 3). Además, la suma de las velocidades de las fallas sub-paralelas en las que se divide la cola de caballo debería ser igual a la velocidad de la falla antes de la división (dislocaciones 114-115; 1.7-1.5 mm/a). Para comprobarlo se suman las velocidades de las ramas F1, F2 i S-FAM. El resultado varía entre 3.1 y 1.6 mm/a. El solape entre ambos valores es en 1.7-

1.6 mm/a, que es la velocidad final considerada para el segmento de Goñar-Lorca de la FAM.

Dislocación (promedio $\pm$ desv. estand.) m	Edad (nombre muestra o fase deposicional)	Velocidad lateral (mm/a)
114 (26.24 $\pm$ 4.58)	23 $\pm$ 2 (G2)	1.7-0.8
115 (42.75 $\pm$ 2.97)	23 $\pm$ 2 (G2)	2.4-1.5
122 (28.70 $\pm$ 3.11)	49 $\pm$ 2 (Carra-2-1)	0.7-0.5
123 (160.21 $\pm$ 12.80)	191 $\pm$ 17 (Carrasc-3)	1.1-0.7
124 (109.72 $\pm$ 5.88)	125-149 (G4)	1.0-0.7
125 (104.03 $\pm$ 5.09)	90-147 (G3-G4)	1.7-0.6
129 (38.24 $\pm$ 6.65)	90-147 (G3-G4)	0.7-0.3
136 (68.83 $\pm$ 11.68)	191 $\pm$ 17 (Carrasc-3)	0.6-0.3

TABLA I. Velocidades de desplazamiento lateral del segmento Goñar-Lorca de la falla de Alhama de Murcia calculadas a partir de dislocaciones medidas en superficie. Las edades utilizadas extraídas de Ortuño et al. (2012).

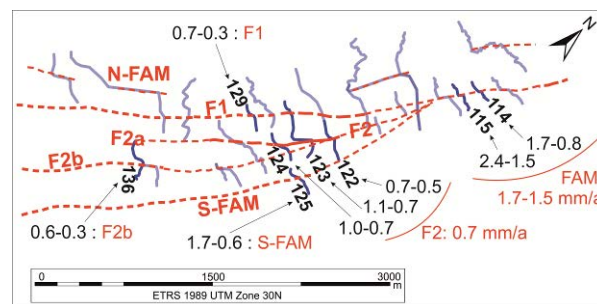


FIGURA 3. Resumen de las velocidades obtenidas a partir de canales dislocados en superficie. Las edades utilizadas se presentan en la Tabla I.

## DISCUSIÓN

### Ventajas y desventajas de los métodos utilizados

Las dos técnicas usadas en este trabajo se complementan y pueden ayudar a descartar o fortalecer resultados individuales. La excavación de trincheras permite un análisis preciso de 1) la correlación entre los segmentos del paleocanal enterrado, 2) la medida de su dislocación, y de 3) la determinación de su edad. Por otro lado, la excavación de trincheras conlleva invertir mucho tiempo y dinero. El análisis de canales en superficie es adecuado cuando la deformación se reparte en más de una traza de falla, aunque aporta menor precisión.

### Resumen de velocidades

Se han obtenido las velocidades de desplazamiento parcial de los segmentos Goñar-Lorca y Lorca-Totana. Para el primero, al comparar la velocidad lateral de la terminación obtenida en este trabajo (1.7-1.6 mm/a

para los últimos 200 ka) con la velocidad vertical calculada por Ortuño et al. (2012) (0.16-0.22 mm/a para los últimos 47-63 ka) se concluye que el componente principal de movimiento es el lateral.

Por otro lado, en el segmento Lorca-Totana, se han obtenido las velocidades total, lateral y vertical (0.9, 0.9 y 0.1 mm/a, respectivamente) solo para la traza SE de la falla. Este segmento está formado por otras dos fallas principales, la rama norte (Martínez-Díaz, 1998) y la frontal que podrían contribuir con desplazamiento. No se dispone de datos específicos de deslizamiento de estas dos trazas, aunque el hecho de que 1) muestran un relieve vertical mucho mayor que la rama sur, y que 2) el hipocentro del terremoto del 2011 en Lorca se nucleó en la rama norte y tuvo un mecanismo focal oblicuo, sugiere un posible *partitioning* de la deformación en este segmento. Así, la rama sur absorbería la mayor parte del componente lateral de la FAM, mientras que las dos otras ramas tendrían una cinemática principalmente vertical.

### Implicaciones regionales

Nuestros resultados incrementan el valor de velocidad de desplazamiento de la falla de Alhama de Murcia (FAM) y la reafirman como una de las fallas más activas de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO). La Figura 4 muestra las velocidades conocidas de fallas activas en la ZCBO. Cabe tener mucho en cuenta que dichos valores no son directamente comparables ya que se refieren a períodos distintos. El mapa muestra una falta de datos referentes a los segmentos septentrionales de la FAM, el segmento NE de la falla de Carrascoy, y la falla de Palomares para el período Pleistoceno superior-Holoceno, lo que hace aun difícil analizar la muy posible interacción de estas fallas como sistema generador de terremotos y, en consecuencia, acotar su influencia en la peligrosidad sísmica.

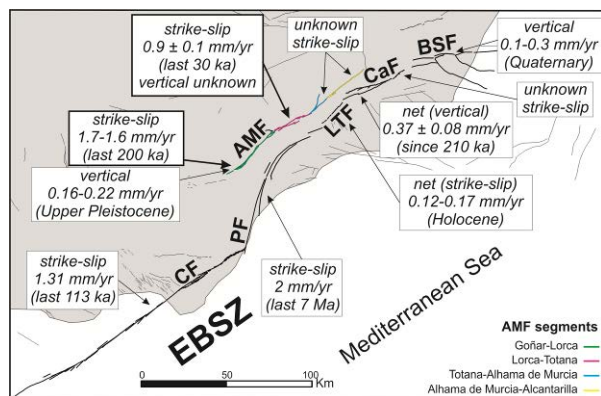


FIGURA 4. Resumen de los valores de velocidad de desplazamiento de las fallas de la Zona de Cizalla de las Béticas Orientales (ZCBO; Weijermars, 1987; Alfaro et al., 2012; Ortuño et al., 2012; Moreno et al., 2015; Martín-Banda et al., 2015; este estudio en negrita). Leyenda: CF, falla de Carboneras; PF, falla de Palomares; LTF, falla de Los Tollos; CAF, falla de Carrascoy; BSF, falla de Bajo Segura. Fallas extraídas del Quaternary Active Faults Database of Iberia from IGME (2015).

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha financiado con los proyectos SHAKE CGL2011-30005-C02-02, PREVENT CGL2015-66263-R y RISKMAT-2014SGR/1243.

### REFERENCIAS

- Alfaro, P., Bartolomé, R., Borque, M.J., Estévez, A., García-Mayordomo, J., García-Tortosa, F.J., Gil, A.J., Gràcia, E., Lo Iacono, C. y Perea, H. (2012): The Bajo Segura Fault Zone: Active blind thrusting in the Eastern Betic Cordillera (SE Spain). *Journal of Iberian Geology*, 38: 271-284.
- Ferrater, M., Arrowsmith, R., y Masana, E. (2015): Lateral offset quality rating along low slip rate faults: application to the Alhama de Murcia fault (SE Iberian Peninsula). *Remote sensing*, 7: 14827-14852.
- López-Comino, J.Á., Mancilla, F.D.L., Morales, J., y Stich, D. (2012): Rupture directivity of the 2011, Mw 5.2 Lorca earthquake (Spain). *Geophysical Research Letters*, 39: 1-5.
- Martín-Banda, R., García-Mayordomo, J., Insua-Arévalo, J.M., Salazar, Á.E., Rodríguez-Escudero, E., Álvarez-Gómez, J.A., Medialdea, A. y Herrero M.J. (2015): New insights on the seismogenic potential of the Eastern Betic Shear Zone (SE Iberia): Quaternary activity of the Carrascoy Fault Zone. *Tectonics*, 34: doi:10.1002/2015TC003997.
- Martínez-Díaz, J.J., Masana, E., y Ortuño, M. (2012): Active tectonics of the Alhama de Murcia fault, Betic Cordillera, Spain. *Journal of Iberian Geology*, 38: 253-270.
- Masana, E., Martínez-Díaz, J.J., Hernández-Enrile, J.L., y Santanach, P. (2004): The Alhama de Murcia fault (SE Spain), a seismogenic fault in a diffuse plate boundary: Seismotectonic implications for the Ibero-Magrebien region. *Journal of Geophysical Research*, 109: B01301
- Moreno, X., Masana, E., Pallàs, R., Gràcia, E., Rodés, Á. y Bordonau, J. (2015): Quaternary tectonic activity of the Carboneras Fault in the La Serrata range (SE Iberia): Geomorphological and chronological constraints. *Tectonophysics*, doi: 10.1016/j.tecto.2015.08.016.
- Ortuño, M., Masana, E., García-Melendez, E., Martínez-Díaz, J., Stepáncikova, P., Cunha, P.P., Sohbaty, R., Canora, C., Buylaert, J.P., y Murray, A.S. (2012): An exceptionally long paleoseismic record of a slow-moving fault: The Alhama de Murcia fault (Eastern Betic shear zone, Spain). *Geological Society of America Bulletin*, 124: 1474-1494
- Weijermars, R. (1987): The Palomares brittle-ductile Shear Zone of southern Spain. *Journal of Structural Geology*, 9: 139-157.
- Zechar, J.D., y Frankel, K.L. (2009): Incorporating and reporting uncertainties in fault slip rates. *Journal of Geophysical Research*, 114: B12407.