

# Mapa de esfuerzos activos en línea de la Península Ibérica a partir de Mecanismos Focales calculados desde el Tensor de Momento Sísmico

## *On-line active stress map for the Iberian Peninsula calculated from Seismic Moment Tensor earthquake focal mechanisms*

A. Muñoz-Martín<sup>1,2</sup>, G. De Vicente<sup>1,2</sup>, A.J. Olaiz<sup>3</sup>, L. Antón<sup>4</sup>, R. Vegas<sup>1</sup>, J.L. Granja-Bruña<sup>1</sup>

1 Grupo de Tectonofísica Aplicada. Facultad de Geología, Universidad Complutense. 28040 Madrid, España. amunoz@geo.ucm.es

2 Instituto de Geociencias IGEO (CSIC-UCM), Madrid, Spain.

3 Repsol Exploración, S.A. Paseo de la Castellana, 278-280. 28046 Madrid, España.

4 Facultad de Ciencias. UNED. 28040 Madrid, España.

**Resumen:** Este trabajo muestra el nuevo mapa en línea de esfuerzos activos para la Península Ibérica obtenido a partir de la inversión de mecanismos focales de terremotos (MF) calculados con Tensor de Momento Sísmico (TMS). Un total de 299 MF han sido seleccionados con varios criterios de calidad de diferentes catálogos (CMT Harvard, ETH, Med-Net, I.G.N. e I.A.G.), para un periodo comprendido entre 1973 y enero de 2012 y profundidades menores de 60 km. Los valores de la dirección de máximo acortamiento horizontal (Dey) y el factor de forma (carga horizontal/vertical) han sido calculados siguiendo a De Vicente et al. (2008). Los resultados obtenidos se han interpolado a una malla regular de 10', teniendo en cuenta las orientaciones de las componentes horizontales de esfuerzo, y el factor de forma. Los mapas finales muestran una buena correlación con indicadores geológicos y cinemáticos. Las orientaciones de los esfuerzos horizontales se relacionan con las fuerzas primarias provenientes de los límites de placas, y con perturbaciones locales relacionadas con heterogeneidades de primer orden a nivel cortical. Tanto los mapas, como los datos procesados son accesibles a través de la Web del Grupo de Tectonofísica Aplicada de la UCM <http://www.ucm.es/info/ta/ta.html>.

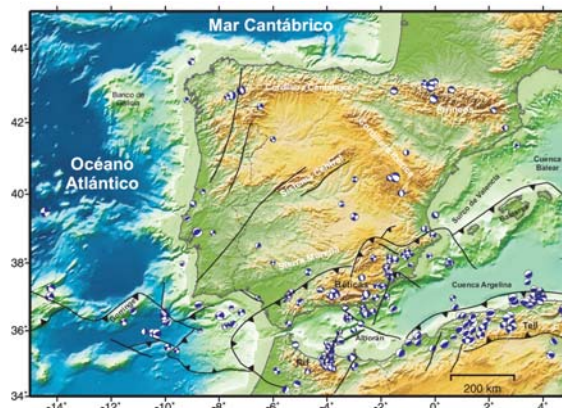
**Palabras clave:** Mapa de esfuerzos activos, mecanismo focal de terremoto, inversión de tensor de momento, Iberia.

**Abstract:** This work shows a new on-line stress map for Iberian Peninsula obtained from the inversion of earthquakes focal mechanisms calculated with the centroid moment tensor. An amount of 299 focal mechanisms have been selected with several quality criteria from different catalogues (CMT Harvard, ETH, Med-Net, I.G.N. and I.A.G.) from 1973 to January 2012. Values for the maximum horizontal stress and the shape factor of the ellipsoid (horizontal/vertical stress) have been calculated following De Vicente et al. (2008). The local results have been interpolated to a 10' regular grid in which the relation between tectonic horizontal stress and vertical load has been taken into account. The final map shows a good correlation with the primary tectonic forces generated in the plate boundaries and the local perturbations related with main crustal heterogeneities. Both the maps and data are free for download from <http://www.ucm.es/info/ta/ta.html> Applied Tectonophysics Group WebSite).

**Key words:** active stress map, earthquake focal mechanism, centroid moment inversion, Iberia.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los últimos años se han realizado numerosos trabajos para la determinación del campo de esfuerzos actual en todo el mundo, y en especial en la Placa Euroasiática. Aunque esta región presenta una gran heterogeneidad tectónica, las direcciones de máxima compresión horizontal permanecen constantes en la corteza superior a lo largo de miles de kilómetros. Estas direcciones son el resultado de la fuerza de empuje de la Dorsal Centroatlántica y la fuerza colisional generada en el límite convergente del sur de Europa (Müller et al., 1992, Olaiz et al., 2009). Todos estos trabajos tuvieron como resultado la creación de



una base de datos a escala global (*World Stress Map*, WSM), que se mantiene y actualiza en el GFZ de Postdam (Heidebach et al., 2008). La base de datos consta de más de 21,000 datos de esfuerzos, la mayor parte de ellos procedentes de Mecanismos Focales de terremotos (MF). Aunque esta base de datos incluye índices de calidad de los datos, la mayor parte de los MF han sido calculados a partir de polaridades de primeras llegadas de ondas P. Por otra parte en el WSM se incluyen como orientaciones de esfuerzos los ejes P de los MF. Si bien estos ejes P marcan la máxima amplitud del patrón de radiación de las ondas P en el cuadrante de dilataciones, su orientación no tiene porqué coincidir con el eje de máxima compresión (s1), ya que ésta depende, además de la orientación del plano de falla, de la forma del tensor de esfuerzos (definido por la razón de esfuerzos, R) y de los parámetros mecánicos del plano de falla (especialmente el coeficiente de fricción al deslizamiento,  $\mu$ ). Desde hace algunos años, se han publicado en algunas instituciones catálogos abiertos de MF de terremotos calculados a partir del modelado del Tensor de Momento Sísmico – TMS (Diezowski et al., 1982; Stich et al., 2006; Rueda y Mezcua, 2005). La ventaja que tienen estos MF es su mayor fiabilidad, especialmente si se considera el porcentaje de ajuste a un modelo de doble par de fuerzas. Esta mayor fiabilidad se debe a que el TMS se calcula mediante un proceso de inversión que tiene en cuenta las tres componentes de los sismogramas (en un rango de frecuencias bajas, normalmente de 0.02-0.05 Hz) y no una única polaridad de la componente vertical de la fase P, siendo además mucho menos dependiente de la distribución de estaciones alrededor del epicentro.

El objetivo de este trabajo es la presentación del mapa de esfuerzos activos de la Península Ibérica en línea, obtenido a partir de MF calculados con el método del TMS, que se va a mantener y revisar semestralmente para que esté a disposición de la comunidad científica y de la industria de una manera rápida y accesible a través de la WEB del Grupo de Investigación de Tectonofísica Aplicada de la UCM (<http://www.ucm.es/info/lta/lta.html>).

## FUENTES DE INFORMACIÓN UTILIZADAS Y METODOLOGÍA

Los estudios de esfuerzos activos se realizan con distintos indicadores: MF de terremotos, roturas en sondeos y marcadores geológicos. En los últimos años las redes sísmicas han sido perfeccionadas, de tal manera que permiten calcular MF de menor magnitud y con un menor error. En este trabajo se han recopilado los MF calculados mediante el TMS de los siguientes catálogos: CMT de Harvard (19 terremotos con Mw entre 5.0 y 7.1); el Servicio Sismológico Suizo (ETH) (34 terremotos con Mw entre 3.8 y 5.8); Mednet (9 terremotos con Mw entre 4.5 y 6.8, Pondrelli et al., 2011). En España, el Instituto Andaluz de Geofísica (I.A.G.) ha calculado 199 MF de terremotos con Mw entre 2.6 y 5.9 (Stich et al., 2006). Desde el año 2002 el Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.) calcula MF con TMS para terremotos de Mw > 3.2 (Rueda y Mezcua, 2005) (35 terremotos con Mw entre 3.2 y 5.5). Además se han incluido en la base de datos otros dos MF calculados con TMS: terremotos de Benavente (Portugal) de 1909 de Mw=6.0 y Escopete (Guadalajara) de 2007 de Mw =4.1. En total se han recopilado 299 MF calculados mediante el TMS, hasta

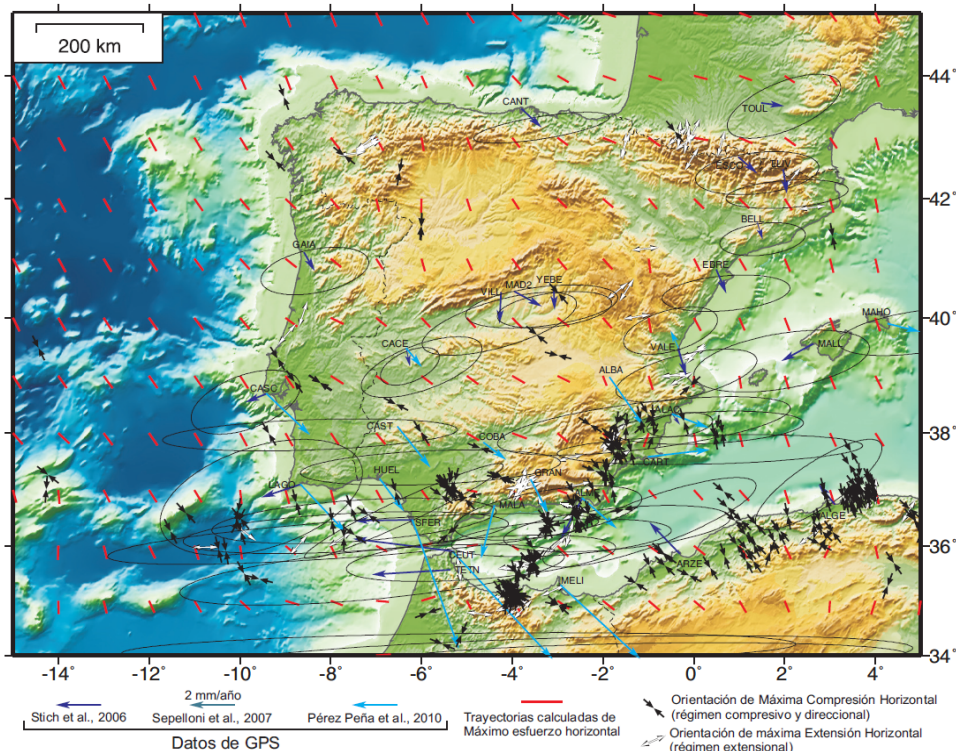


FIGURA 2. Mapa de esfuerzos activos de la Península Ibérica. Las flechas negras indican la orientación del máximo acortamiento horizontal (Dey), para regímenes compresivos y de desgarre. Las flechas blancas indican la dirección de extensión horizontal (Dex) para regímenes extensionales. Las flechas de colores indican el desplazamiento horizontal calculado de Iberia respecto África por diferentes autores, con las elipses de error estimadas.

el 31/12/2011. Debido a que algunos de estos terremotos aparecen en varios catálogos con distinta solución, se ha optado por elegir el mecanismo que presenta una menor desviación respecto al modelo de doble par de fuerzas, con el objetivo de seleccionar los de mayor calidad. Finalmente se han seleccionado los que tiene una profundidad focal menor o igual a 60 km con el fin de estudiar los esfuerzos en la corteza o manto superior, y no los ligados a otros procesos como la subducción. La figura 1 muestra la proyección de MF utilizados para la realización de los mapas.

Para el cálculo de la orientación y el factor de forma del elipsoide de esfuerzos se ha aplicado la metodología basada en el modelo de deslizamiento, previamente utilizada en diferentes contextos tectónicos y escalas (De Vicente et al., 2008; Olaiz et al., 2009). Este método asume un paralelismo entre los ejes de deformación frágil y de esfuerzos, y asume que uno de los ejes se sitúa cerca de la vertical. La principal ventaja es que proporciona un valor del factor de forma del elipsoide  $e_y/e_z$  ( $K'$ ) y de la dirección de máximo acortamiento horizontal (Dey) para cada evento. Dado que el parámetro  $K'$  presenta unos valores entre  $+\infty$  y  $-\infty$ , se ha procedido a un escalado de los valores, normalizando el valor de  $K'$  entre 0 y 300 (Tabla 1), para una representación cartográfica homogénea. Una vez calculados los valores de Dey y  $K'$  para cada MF, se descompusieron las orientaciones de Dey en sus componentes X e Y, y se interpolaron dichas componentes a una malla regular de  $10^\circ$  de grado. Finalmente, se han proyectado los vectores resultantes de máximo acortamiento horizontal cada  $30^\circ$  para una representación homogénea (Fig. 2).

En relación al régimen de esfuerzo/deformación presente en la corteza continental (o en la parte elástica superior de la litosfera para el caso oceánico), se ha realizado una interpolación de los valores normalizados de  $K'$  a una malla regular de  $10^\circ$ . Posteriormente se ha muestreado a una malla de  $1^\circ$ , con el objetivo de poder superponer los valores de factor de forma a la topografía en forma de sombreado artificial según una dirección  $330^\circ$  (Fig. 3).

## DISTRIBUCIÓN DE LOS REGÍMENES DE ESFUERZOS

El mapa de distribución espacial de régimen de esfuerzos muestra la complejidad del límite de placas entre Eurasia y África. La zona situada al N de la península muestra un régimen de esfuerzos extensional. Por el contrario, al S de la Península y N de África coexisten zonas con régimen compresivo (SO de la Península Ibérica - Banco de Goringe, N de Argelia), y zonas con régimen extensional (Béticas, Rif y Mar de Alborán). La transición entre estos regímenes se produce de dos modos: a) zonas con alto gradiente en el factor de forma que indican una transición rápida (ej. entre el Mar de Alborán y la Cuenca de Argelia); b) zonas con una transición progresiva, donde domina el régimen de desgarre, como sucede en el centro-oeste de la Península Ibérica.

| $K' = e_y/e_z$                | Factor de Forma Normalizado (NK)                                 | Régimen de esfuerzos  | Número (%)   |
|-------------------------------|--|-----------------------|--------------|
| $0.0 \leq k' \leq 0.1$        | $NK = k' \cdot 100$<br>$0 \leq k' \leq 10$                       | Extensión uniaxial    | 30<br>10.00% |
| $0.1 \leq k' \leq 1$          | $NK = k' \cdot 100$<br>$10 \leq k' \leq 100$                     | Normal<br>direccional | 47<br>15.60% |
| $1 \leq k' \leq 10$           | $NK = \text{Log}(k') + 100$<br>$100 \leq k' \leq 110$            | Direccional normal    | 61<br>20.30% |
| $k' \geq 10$<br>$k' \leq -10$ | $NK =  10 \cdot \text{Log} k'  - 200 $<br>$110 \leq k' \leq 190$ | Desgarres             | 26<br>8.70%  |
| $-2 \geq k' \geq -10$         | $NK =  10 \cdot \text{Log} k'  - 200 $<br>$190 \leq k' \leq 200$ | Direccional-inverso   | 37<br>12.40% |
| $-1 \geq k' \geq -2$          | $NK = (k' + 2) \cdot 100 + 200$<br>$200 \leq k' \leq 290$        | Inverso-direccional   | 30<br>10.00% |
| $-1 \geq k' \geq -1.1$        | $NK = (k' + 2) \cdot 100 + 200$<br>$290 \leq k' \leq 300$        | Compresión uniax.     | 69<br>23.00% |

TABLA I. Valores de  $K'$ , factor de forma recalculado (NK) para la interpolación, régimen de esfuerzos y nº de MF utilizados.

Las zonas que presentan una deformación en régimen compresivo definen donde el límite de placas Eurasia-África está mejor definido, y donde existe también un mayor acoplamiento reológico (De Vicente y Vegas, 2009). Esta compresión se extiende de manera amortiguada, hacia el interior peninsular, afectando al basamento varisco del Macizo Ibérico (Sierra Morena, Montes de Toledo y Sistema central), aunque con una menor componente compresiva (régimen transpresivo). Hacia el NO de la península, este régimen limita de un modo muy neto, con una zona transtensiva a lo largo del sistema de fallas de Vilariça, de dirección NNE-SSO (De Vicente y Vegas, 2009). Desde el margen galaico-portugués hacia el E (*offshore*), no existe una densidad de información suficiente para constreñir el régimen, pero parece estar dentro del régimen de desgarre.

El régimen extensional aparece en tres zonas geográficamente separadas. La más importante se sitúa en el tercio NE de la península, afectando a la Cordillera Ibérica y Pirineos, donde los terremotos son fundamentalmente extensionales, y se prolonga hacia el E por toda la Cordillera Cantábrica. Estas zonas extensionales coinciden en buena parte con los principales relieves del orógeno Pirenaico lo que, unido a los datos de GPS, sugiere una deformación extensional probablemente asociada al levantamiento isostático de la corteza engrosada bajo estas cadenas y su desmantelamiento erosivo. A este efecto se le superponen los procesos extensionales en el Surco de Valencia. La segunda zona extensional se sitúa en el Sistema Béticas-Rif-Alborán, coincidiendo con el desacoplamiento reológico entre Eurasia y África que supone el Bloque de Alborán, propuesto por De Vicente y Vegas (2009), y su límite oriental se sitúa a lo largo de una zona de transferencia ya descrita por numerosos autores de orientación NE-SO, y con evidencias de fallas activas.

## ORIENTACIONES DE LA MÁXIMA COMPRESIÓN HORIZONTAL

La figura 2 muestra el mapa de orientaciones de máximo esfuerzo horizontal, así como datos de GPS recientes en el entorno de la Península Ibérica (Stich et al., 2006; Pérez-Peña et al., 2010). Este mapa resulta congruente con las principales estructuras geológicas activas, así como con numerosos trabajos previos realizados a partir de distintas aproximaciones. La ventaja que presenta es que es homogéneo para toda la

zona analizada, y se extiende a zonas marinas, si bien la densidad de información no es homogénea. El mapa muestra una orientación general del máximo acortamiento horizontal NO-SE, con dos perturbaciones principales: La primera se sitúa en el cierre del arco de Gibraltar, donde el acortamiento principal es E-O, y cuyos bordes presentan trayectorias dispuestas en abanico, asociadas a la terminación lateral de dicho arco. La segunda se sitúa en los Pirineos, donde las trayectorias pasan a situarse también E-O, paralelas al eje de la cadena y a los relieves principales. La comparación del mapa de trayectorias con las orientaciones de los vectores de desplazamiento horizontal calculados a partir de GPS es en general muy buena (Fig. 2). Las principales discrepancias se observan en zonas como las Islas Baleares, donde no hay datos de MF calculados con TMS, y donde los datos de GPS de diversos autores son también discrepantes.

## DISCUSIÓN Y DISPONIBILIDAD DE LOS MAPAS

Los mapas de esfuerzos activos obtenidos a partir de MF calculados con el método del TMS, permiten visualizar las variaciones en orientaciones y factor de forma del régimen de esfuerzo/deformación asociadas a diferentes ambientes tectónicos y grandes heterogeneidades geológicas. Estos mapas son un marco de referencia regional para situar estudios de esfuerzos y estructuras activas de menor escala. El mapa refleja un patrón general perpendicular a los límites primarios (Dorsal Medio-Atlántica y zona de convergencia entre el S de Europa y N de África). Las principales perturbaciones en la orientación de los esfuerzos horizontales están asociadas al cierre del arco de Gibraltar y a límites geológicos de primer orden (sutura Pirenaica, margen Atlántico). Por lo que respecta al régimen de esfuerzos, éste presenta una mayor complejidad en su distribución que las orientaciones de los esfuerzos horizontales. En el entorno de la Península aparecen dos áreas con deformación en régimen compresivo (SO peninsular y N de Argelia) separados por una zona extensional en el bloque Béticas-Rif-Alborán. En la zona de antepaís ibérico es dominante el régimen de desgarre (con una cierta componente extensional o compresiva), y este régimen parece prolongarse hacia el O hacia la corteza oceánica atlántica. En el NO peninsular es dominante un régimen extensional-direccional, que limita con la zona centro a favor del sistema de fallas NNE de Vilarica. El N y el cuadrante NE de la península aparecen claramente definidos como una zona de régimen extensional, especialmente en Pirineos y Cordillera Ibérica, prolongándose esta extensión hacia el O por toda la Cordillera Cantábrica. Esta extensión puede estar asociada al desmantelamiento erosivo y su compensación isostática debido al engrosamiento cortical pirenaico.

Los datos del Mapa están disponibles para toda la comunidad en forma de mapa de trayectorias y de régimen de esfuerzos en la Web del Grupo de Investigación de Tectonofísica Aplicada de la UCM (<http://www.ucm.es/info/lta/lta.html>), y se podrán

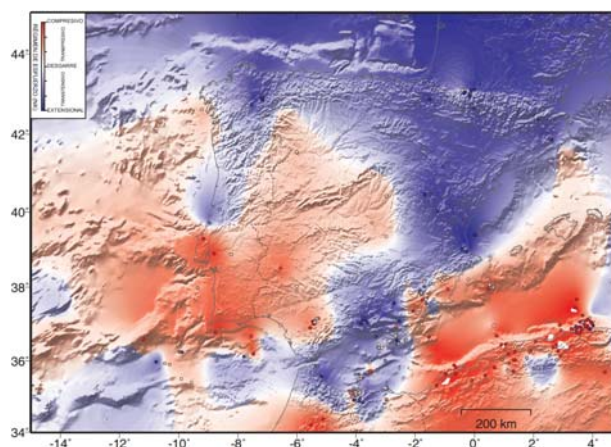


FIGURA 3. Mapa del régimen de esfuerzos activos de la Península Ibérica interpolado a una malla regular de 10' de grado. El régimen de esfuerzos se ha representado mediante el valor normalizado del parámetro  $K'$  (Tabla I).

solicitar los datos actualizados con los valores calculados de Dey y régimen de esfuerzo para los MF.

## AGRADECIMIENTOS.

Este trabajo ha sido financiado por los Proyectos de Investigación TopoIberia (CSD2006-00041) y UCM-Santander GR35/10-A-910342.

## REFERENCIAS

- De Vicente, G., Cloetingh, S., Muñoz-Martín, A., Olaiz, A., Stich, D., Vegas, R., Galindo, J., y Fernández-Lozano, J. (2008). *Tectonics*, 27.
- De Vicente, G. y Vegas, R., 2009. *Tectonophysics*, 474: 124–143.
- Dziewonski, A.M., Chou, T.A. y Woodhouse, J.H., 1982. *J. Geophys. Res.* 86, 2825–2852.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfes, D. y Müller, B. (2008). *The World Stress Map database release 2008*.
- Müller, B., Zoback, M. L., Fuchs, K., Mastin, L. G., Gregersen, S., Pavoni, N., Stephansson, O. y Ljunggren, C. (1992). *J. Geophys. Res.*, B, 97: 11783–11803
- Olaiz, A.J., Muñoz-Martín, A., De Vicente, G., Vegas, R. y Cloetingh, S. (2009). *Tectonophysics*, 474: 33–40.
- Pérez-Peña, A., Martín, J., Gárate, J., Berrocoso, M., y Buforn, E. (2010). *Journal of Geodynamics*, 49: 232–240.
- Pondrelli, S., Salimbenia, A. Morellia, G. Ekströmb, L. Postpischla, G. Vannuccia y E. Boschic (2011). *Physics of the Earth and Planet. Int.*, 185 74–81.
- Rueda, J. y Mezcua, J.(2005). *Seismological research letters*, 76,(4): 455-465.
- Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, F.L. y Morales, J. (2006). *Tectonophysics*, 426: 295–317.