

# Estado de esfuerzos actuales en el centro peninsular a partir del análisis conjunto de mecanismos focales de terremotos

*Present stress field in central iberia from earthquake focal mechanism global analysis*

J.L. Giner (\*), G. De Vicente (\*) y R. Lindo (\*\*)

(\*) Dpto. de Geodinámica. Facultad de CC. Geológicas, Univ. Complutense, 28040 Madrid.

(\*\*) Dpto. de Geofísica y Meteorología. Facultad de CC. Físicas, Univ. Complutense, 28040 Madrid

## ABSTRACT

*This study establishes current stress field in Central Iberia using earthquake focal mechanisms analysis. Inversion procedure is based on fault populational analysis. Two different orthogonal stress fields have been deduced. Regional one, with N130°E  $\sigma_{HMAX}$  trend and a secondary one, N40°E.*

**Key words:** *current stress field, focal mechanisms, maximum horizontal shortening direction ( $\sigma_{HMAX}$ ).*

*Geogaceta, 20 (4) (1996), 996-999*

*ISSN: 0213683X*

## Introducción

La zona analizada se localiza en el centro peninsular (fig. 1). Geológicamente comprende la Cuenca terciaria de Madrid, la zona oriental de la Cuenca del Duero, el Sistema Central, área occidental de la Cordillera Ibérica y la zona este de los Montes de Toledo.

## Metodología

En este trabajo se realiza un análisis del estado de esfuerzos actual en la zona del centro peninsular mediante métodos de análisis poblacional de los mecanismos focales de terremotos.

Este análisis, permite construir con mayor objetividad el mecanismo focal individual, ya que se determina conjuntamente el campo de esfuerzos regional bajo el cual se han producido los sismos analizados.

El procedimiento aplicado en las metodologías de análisis conjunto de mecanismos focales, consiste en determinar el plano de falla de cada uno de los mecanismos focales (orientación y cabeceo de la estría) mediante métodos de análisis poblacional de fallas; de modo que el conjunto se ajuste a un tensor de esfuerzos común; y que, además, cada una de estas fallas responda a la construcción del mecanismo focal que acierte más polaridades en las primeras llegadas de la onda P. La diferencia entre cada uno de los métodos reside en los algoritmos de cálculo del tensor de esfuerzos, y en la forma de determinar la calidad geométrica del mecanismo (posiciones de las polaridades de la onda P, con respecto a los planos nodales definidos en la construcción del mecanismo).

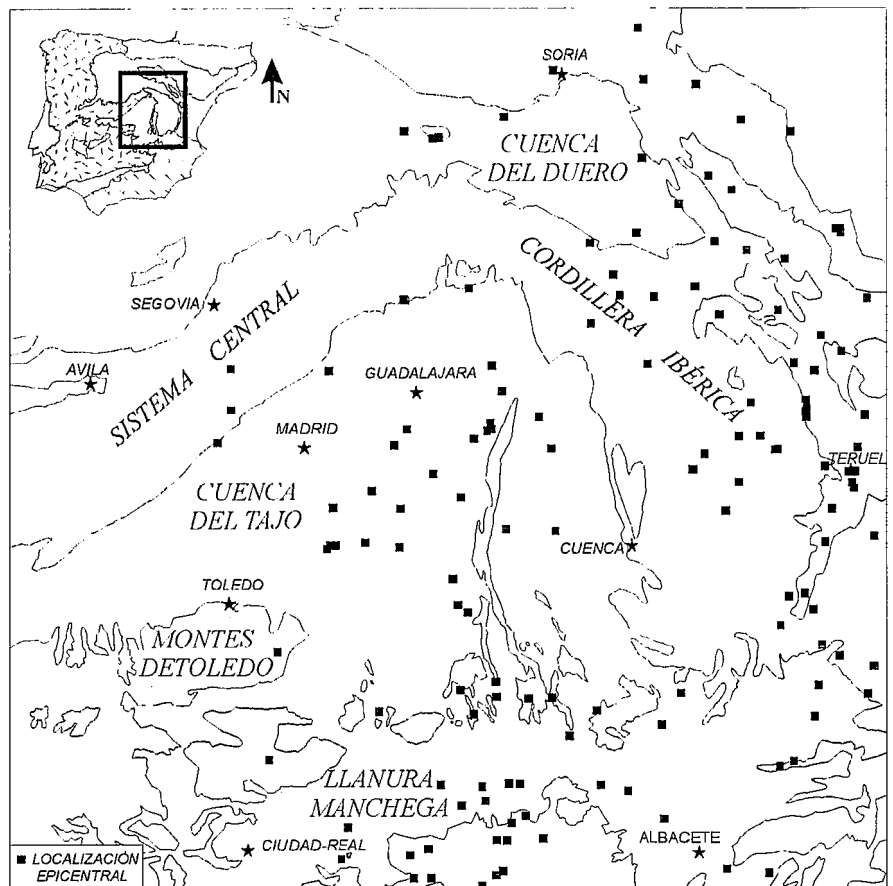


Fig. 1.- Localización geográfica y geológica del área de estudio. Localización de los epicentros de los sismos catalogados en el área de estudio entre los años 1800-1994 (I.G.N., 1994).

Fig. 1.- Location of the region of interest in the study. Overview of seismicity recorded by the national network from 1800 to 1994 (I.G.N., 1994).

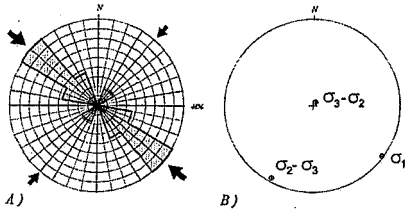


Fig. 2.- Resultados del análisis de los 22 sismos elegidos mediante: A) Método de Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales (Giner, inédito). Se representa la rosa de orientaciones de máximo acortamiento horizontal ( $\sigma_{HMAX}$ ) de los mecanismos focales obtenidos. B) Método de Determinación Simultánea del Tensor de Esfuerzos y los Mecanismos Focales individuales (Rivera y Cisternas, 1990). Proyección estereográfica (proyección Schmidt hemisferio inferior) de los ejes principales del tensor de esfuerzos deducido para el conjunto de los sismos analizados.

Fig. 2.- Results from the analysis of the 22 selected earthquakes by using: A) The Focal Mechanisms Population Weighted Analysis (Giner, in press). Rose diagrams representation of maximum horizontal shortening ( $\sigma_{HMAX}$ ). B) The simultaneous determination of the orientation and shape of the regional stress tensor and of individual fault plane solutions (Rivera and Cisternas, 1990). The principal axes, of the stress tensor are represented by using the Schmidt (equal area) projection of the lower hemisphere.

En nuestro caso, para el realizar este análisis utilizamos dos metodologías distintas, pero ambas basadas en las premisas descritas:

-Método de *Determinación Simultánea del Tensor de Esfuerzos y los Mecanismos Focales individuales* (Rivera y Cisternas, 1990).

-Método de *Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales* (Giner, inédito).

La primera metodología empleada se fundamenta en la determinación conjunta de un tensor de esfuerzos y de los mecanismos focales individuales compatibles con ese tensor (Rivera, 1989; Rivera y Cisternas, 1990). Consiste en analizar todas las polaridades de las primeras llegadas de la onda P en cada una de las estaciones que registrarán el evento; y obtener conjuntamente, tanto el tensor de esfuerzos compatible con todos los sismos, como los planos de falla de los mecanismos focales individuales que más se ajusten a ese tensor regional obtenido. El método toma como punto de partida un desarrollo de la *Hipótesis de Bott* (1959).

En el análisis mediante este método, se tiene que tener en cuenta, que la población de sismos elegida se debe localizar en una zona en la que se considere que el tensor de esfuerzos es homogéneo.

La segunda metodología, consiste en reali-

zar un análisis poblacional ponderado de los planos de falla de todas las posibles construcciones de los mecanismos focales de los sismos analizados, estableciendo el tensor de esfuerzos al que mejor ajustan los sismos analizados, determinando, en el transcurso del análisis, tanto el plano de falla, como el mecanismo focal de cada uno de los sismos. A diferencia del proceso anterior, esta metodología, establece un peso para cada uno de los sismos en función de su magnitud.

**Análisis y determinación de mecanismos focales**

Para la elección de los sismos se han contrastado dos parámetros: la magnitud del sismo y el número de polaridades (polaridad de la primera llegada de la onda P a cada estación de registro sísmico). Se ha considerado una magnitud mínima de 3.0 (Zoback, 1992), y un número de polaridades de la onda P mayor de 6 (Delouis *et al.*, 1993).

Del total de los sismos catalogados en el área de estudio en el período 1975-1994, tan sólo 22 cumplían los requisitos mínimos de calidad establecidos (tabla I). Las magnitudes de los sismos oscilan entre 3.0 y 4.1.

Para la obtención de los datos necesarios en la construcción de los mecanismos focales, previamente se ha procedido a la relocalización de los sismos mediante el programa HYPOINVERSE (Klein, 1978) (tabla II), utilizando el modelo estratificado de corteza, y la relación  $V_p/V_s$  utilizados por el I.G.N. (I.G.N., 1993)

Los resultados obtenidos del análisis de los 22 eventos mediante las dos metodologías utilizadas, muestran que el conjunto de sismos analizados se ajustan a una orientación de máxima compresión horizontal ( $\sigma_{HMAX}$ ) según SE-NW.

Del análisis mediante el método de *Determinación Simultánea del Tensor de Esfuerzos y los Mecanismos Focales Individuales* (Rivera y Cisternas, 1990), se deduce un tensor de ajuste para el conjunto de los sismos: con  $\sigma_1$  en la horizontal, orientado según N125°E;  $\sigma_2$  en la vertical y  $\sigma_3$  en la horizontal según N215°E. El factor de forma ( $R = \sigma_z - \sigma_x / \sigma_y - \sigma_x$ ) es  $0.0 \pm 0.3$ , por lo que podemos inferir la posible permutación de los ejes  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$  (fig.2.a).

Los resultados obtenidos mediante el *Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales* (Giner, inédito), son análogos a los deducidos con el método anterior: el conjunto de los mecanismos focales deducidos se ajusta a una dirección de máxima compresión horizontal ( $\sigma_{HMAX}$ ) según N130°E (fig.2.b). No obstante, y dadas las características de esta metodología, podemos observar que los sismos que no ajustan a la moda principal, se asimilan a otra moda de menor entidad con una dirección de  $\sigma_{HMAX}$  según N40°E, es decir ortogonal a la moda principal (fig.2b). Esta moda secundaria aparece definida tan sólo por cuatro mecanismos

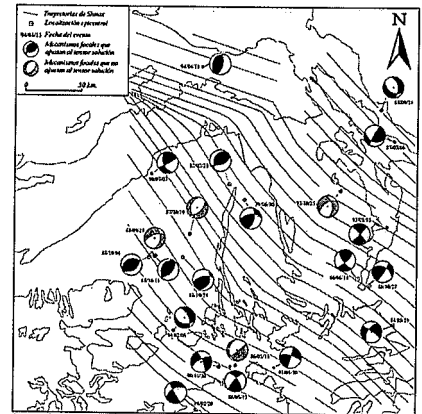


Fig. 3.- Localización de los mecanismos focales deducidos del Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales (en negro los mecanismos compatibles con la moda principal, y en gris los coherentes con la moda secundaria). Orientación de las trayectorias de  $\sigma_{HMAX}$  construidas a partir de las orientaciones puntuales de máximo acortamiento horizontal deducidas de los mecanismos focales compatibles con la moda regional ( $\sigma_{HMAX}$  según N130°E) con el programa LISSAGE (Lee y Angelier, 1994).

Fig. 3.- Epicentral location of seismic events and corresponding fault-plane solutions determined by the focal mechanism population weighted analysis. Black and white ones are coherent with the first stress state (called principal mode); gray and white ones are compatible with the second stress state (secondary mode). Curves defining the direction of  $\sigma_{HMAX}$  were determined from the maximum horizontal shortening direction corresponding to each fault plane solution compatible with the principal mode, by using LISSAGE routine (Lee and Angelier, 1994).

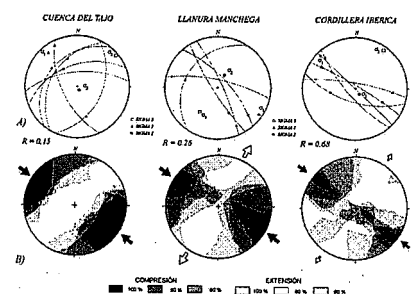


Fig. 4.- Resultados obtenidos del análisis de los planos de falla de los mecanismos focales mediante métodos de análisis poblacional de fallas (*Método de los Diedros Rectos*, Angelier y Mechler, 1977; y *Método de Inversión de Esfuerzos*; Reches *et al.*, 1992); en función de las tres zonas definidas por las trayectorias de máximo acortamiento horizontal.

Fig. 4.- Result from the application of two fault population analysis methods: A) Right Dihedral, Angelier and Mechler, 1977; and B) Stress Inversion; Reches *et al.*, 1992) for three regions established by maximum horizontal shortening direction.

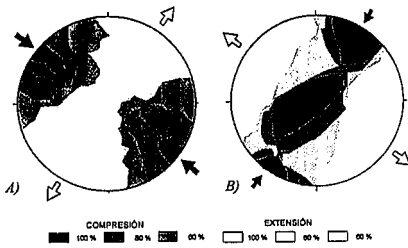


Fig. 5.- Diagramas de diedros rectos obtenidos del análisis de los mecanismos focales compatibles con: A) el estado de esfuerzos regional ( $\sigma_{HMAX}$  según  $N130^{\circ}E$ ); y B) el estado de esfuerzos secundario ( $\sigma_{HMAX}$  según  $N40^{\circ}E$ ).

Fig. 5.- Right Dihedral diagrams obtained for the two sets of fault plane solutions shown in figure 3 and coherent with the two regional stress states called A) principal and B) secondary modes.

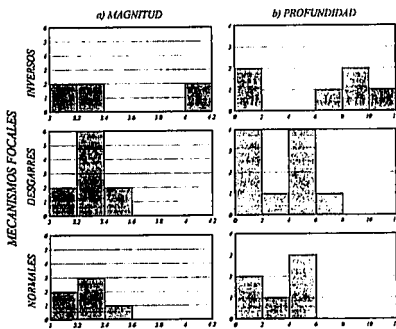


Fig. 6.- Histogramas de frecuencias de las profundidades y magnitudes de los sismos analizados en función del tipo de mecanismos focal deducido: a) inversos, b) direccionales y c) normales.

Fig. 6.- Depth and magnitude frequency histograms of 22 seismic events (figure 3) in considering their type of focal mechanism: a) reverse, b) strike-slip and c) normal.

focales normales del total del 22 analizados (fig.3).

En la zona de la Cuenca de Madrid esta bimodalidad en las orientaciones de  $\sigma_{HMAX}$  queda bien patente, ya que de los 8 mecanismos focales localizados en la zona, 6 son de carácter inverso y se asimilan a la orientación de  $\sigma_{HMAX}$  principal ( $N130^{\circ}E$ ), mientras que los dos mecanismos focales restantes son normales y se ajustan a la moda secundaria ( $N40^{\circ}E$ ) (extensión según  $N130^{\circ}E$ ) (fig.3).

Se han elegido las construcciones de los mecanismos focales deducidos del *Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales* (tabla II), ya que esta metodología contempla la posibilidad de ajustar mecanismos focales compatibles con una misma dirección de máxima compresión horizontal ( $\sigma_{HMAX}$ ) aunque esté de-

	FECHA	HORA	LONGITUD	LATITUD	PR	RMS	EH	EZ	NO	MAG	INT	LOCALIZACION
1	1979-06-30	01-44-35.9	02-31.2W	40-25.8N	10	1.4	8	7	15	4.1		ALCOCER.GU
2	1982-02-23	17-59-15.2	02-45.0W	40-38.2N	7	1.3	3	5	27	4.1	VI	DURON.GU
3	1986-03-13	18-38-43.6	02-43.5W	39-13.8N	5	0.7	2	3	37	3.6	III	VILLARROBLEDO.AB
4	1986-05-13	20-24-19.4	02-40.4W	39-13.7N	5	0.6	3	3	12	3		VILLARROBLEDO.AB
5	1986-05-14	23-55-36.9	01-24.5W	39-53.4N	5	0.7	3	3	30	3.3	V	CARBONERAS.CU
6	1986-10-28	06-48-09.8	01-17.8W	39-50.5N	5	0.5	2	3	24	3.2	IV-V	TALAYUELAS.CU
7	1987-07-06	04-32-25.3	01-00.6W	40-57.1N	5	0.6	2	3	29	3.4		S <sup>o</sup> DE CUCALON.TE
8	1987-10-19	12-54-42.9	03-13.8W	40-12.9N	5	0.2	1	1	13	3.2		VILLAREJO-SALVANES.M
9	1988-05-19	21-16-30.5	01-02.8W	39-32.1N	2	0.5	2	2	17	3.2	III	REQUENA.V
10	1988-09-28	12-43-50.7	03-32.1W	40-05.1N	2	0.3	2	4	13	3		ARANJUEZ.M
11	1988-10-04	13-05-10.9	03-33.6W	40-05.0N	2	0.3	1	3	14	3.1		ARANJUEZ.M
12	1988-10-11	14-15-29.2	03-34.6W	40-04.3N	2	0.4	2	3	11	3.1		ARANJUEZ.M
13	1988-10-24	04-38-51.7	03-14.0W	40-04.7N	9	0.4	2	2	18	3.4	III	FUENTIDUEÑA.M
14	1989-09-24	20-16-03.7	01-09.2W	41-12.2N	3	0.7	2	2	29	3.3		VISTABELLAZ
15	1989-02-20	03-25-36.8	03-04.9W	38-53.5N	7	0.4	1	1	45	3.6	III-IV	ALHAMBRA.CR
16	1990-07-07	23-30-17.7	03-34.5W	40-42.5N	2	0.8	2	2	32	3.3	II-IV	S.A.DE GUADALX.M
17	1990-11-30	21-52-11.9	02-50.9W	39-13.1N	2	0.4	2	2	16	3		SOCUELLAMOS.CR
18	1991-05-30	20-10-39.1	02-17.7W	39-13.3N	2	0.5	1	2	37	3.5		MINAYA.AB
19	1993-08-15	22-32-24.5	01-06.0W	40-17.5N	3	0.4	2	3	34	3.4	IV	TERUEL.TE
20	1993-10-25	00-16-05.8	01-34.5W	40-35.2N	2	0.5	2	2	22	3.2	III	TREMEDAL.TE
21	1994-02-06	05-27-00.0	03-20.0W	39-30.0N	6	0.6	1	6	17	3.5		VILLACAÑAS.T
22	1994-04-06	03-33-00.0	03-33.0W	41-33.0N	11	0.3	2	11	23	3.4	V	BURGO-DE-OSMA.SO

Tabla I.- Parámetros de los sismos elegidos para la determinación del estado de esfuerzos. Calculados a partir de su relocalización mediante el programa HYPOINVERSE: FECHA Fecha del evento, HORA hora origen, LONGITUD y LATITUD, PR profundidad, RMS error cuadrático medio en segundos EH error epicentral (en km.), EZ error en profundidad (en km.), NO número de observaciones, MAG magnitud (mb), INT intensidad máxima(escala MSK).LOCALIZACIÓN localidad y siglas provinciales.

Table I.- Hypocentral parameters of the 22 earthquakes incorporated in the determination of the stress tensor. The earthquakes have been relocated by using the HYPOINVERSE routine. FECHA: Date (yr/m/d), HORA time (hr/min/sec), LONGITUD and LATITUD longitude and latitude. PR depth (km.). RMS root-mean-square travel time residual (sec). EH standard horizontal uncertain (km.). EZ standard vertical uncertain (km.).NO total number of observations. MAG magnitude (mb). INT maximum intensity (MSK scale). LOCALIZACIÓN Location and province code.

	PLANO 1	PLANO 2	EJE P	EJE T		PLANO 1	PLANO 2	EJE P	EJE T
1	58/354	64/102	04/137	44/230	12	29/309	61/137	16/134	74/327
2	36/300	60/158	13/143	67/020	13	39/114	63/345	13/324	61/210
3	79/140	79/264	53/339	32/127	14	60/197	52/080	64/324	01/056
4	67/048	76/312	06/271	26/178	15	79/238	57/335	31/101	15/201
5	72/229	81/136	06/094	19/001	16	57/245	82/150	17/112	29/012
6	77/010	73/276	21/144	03/052	17	79/066	70/332	22/200	06/108
7	44/201	83/298	25/331	36/081	18	72/012	87/103	11/146	15/239
8	55/135	39/286	67/237	19/110	19	89/044	86/134	03/269	03/359
9	83/031	61/297	26/168	15/071	20	60/330	59/083	49/205	02/297
10	63/340	51/094	54/210	10/313	21	57/063	46/192	61/298	06/040
11	44/338	47/143	02/150	82/252	22	26/304	65/104	30/110	68/227

Tabla II.- Orientación de los planos nodales (buzamiento/sentido de buzamiento) y de los ejes de presión (P) y de tensión (T) (inmersión y sentido de la inmersión) de los mecanismos focales deducidos mediante el método de *Análisis Poblacional Ponderado de Mecanismos Focales*.

Table II.- Direction of the nodal planes (dip/dip direction) and P and the axes (plunge/plunge direction) corresponding to all the fault plane solutions determined by the focal mechanism population weighted analysis. Tabla II.- Orientación de los planos nodales (buzamiento/sentido de buzamiento) y de los ejes de presión (P) y de tensión (T) (inmersión y sentido de la inmersión) de los mecanismos focales deducidos mediante el método de

finida por tensores de esfuerzos diferentes.

Las trayectorias de máximo acortamiento horizontal obtenidas mediante el análisis directo mediante el *Modelo de Deslizamiento* (Reches, 1983; De Vicente, 1988) de las fallas de los mecanismos focales que se asimilan a la  $\sigma_{HMAX}$  regional NW-SE, presentan una orientación preferente según N145°E, aunque se pueden establecer tres zonas con orientaciones de trayectorias distintas (fig.3): según N145°E en la Cuenca de Madrid, N130°E en la Cordillera Ibérica, y N115°-120° en la Llanura Manchega. Si analizamos las fallas de los mecanismos focales que definen las trayectorias en cada una de estas zonas (fig.4), observamos que presentan orientaciones de  $\sigma_{HMAX}$  paralelas. No obstante, cabe destacar el carácter más inverso de los tensores obtenidos en las zonas de la Cuenca de Madrid y Llanura Manchega, con respecto al deducido en la Cordillera Ibérica, que presenta un tensor de carácter mucho más direccional.

#### Discusión y conclusiones

Podemos considerar que el estado de esfuerzos actual en el centro peninsular está definido por un tensor regional de carácter direccional, con una orientación de  $\sigma_{HMAX}$  según N135°-140°E (fig.5.a). Este estado de esfuerzos ha de relacionarse con el movimiento relativo de las placas Africana y Euroasiática. Además coincide con los obtenidos mediante análisis semejantes, tanto en Francia (Delouis *et al.*, 1993), como en Portugal (Ribeiro *et al.*, 1994). No obstante, aparece otro estado de esfuerzos que actúa de forma simultánea al regional (fig.5.b). Este estado de esfuerzos está definido por un tensor de carácter normal-direccional, con una dirección de  $\sigma_{HMAX}$  ortogonal a la deducida para el tensor regional según N45°-55°E, es decir definiría una extensión según N135°-145°E ( $\sigma_{HMIN}$ ), subparalela a la compresión regional deducida.

La coexistencia de dos direcciones ortogonales en la dirección del esfuerzo máximo horizontal ( $\sigma_{HMAX}$ ), nos permite inferir que se ha producido una permutación de los ejes de esfuerzo.

La permutación de los ejes principales de esfuerzo, puede deberse: bien a la presencia de una flexura cortical, o bien al

desarrollo de escapes laterales a favor de estructuras preexistentes orientadas según N40°-60°E. La coexistencia en el espacio y en el tiempo de dos direcciones de  $\sigma_{HMAX}$  ortogonales ha sido puesta de manifiesto en zonas próximas al área de estudio: Fida Medina (1995), en la zona norte de Marruecos; Herraiz *et al.*, (en prensa) en Sierra Albarrana, Córdoba; etc.

Si consideramos, tanto la profundidad de los sismos, como las magnitudes de los mismos, en función del tipo de falla que definen los mecanismos focales (fig.6), observamos que los definidos por fallas inversas, son más profundos y presentan magnitudes mayores. Este hecho, y aún considerando el reducido número de datos, nos permite considerar más probable la hipótesis de una flexura cortical que defina dos estados de esfuerzos separados por una superficie de no deformación longitudinal finita: uno de carácter inverso-direccional más profundo, inducido desde los límites de placas; y el otro, más superficial, y de carácter normal-direccional, producido por la respuesta de la corteza superior a esa flexura. En concreto, en la Cuenca de Madrid, la sismicidad se concentra en la zona en que, según distintos estudios (Van Wees, 1994; Van Wees *et al.*, 1995; De Vicente *et al.*, en prensa) la corteza superior esta flexurada como respuesta a la compensación isostática del movimiento total acumulado (en salto vertical de al menos 5 km.) de la falla del Borde Sur del Sistema Central (Racero, 1988; De Vicente *et al.*, 1996; De Vicente *et al.*, en prensa).

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por una beca del Consejo de Seguridad Nuclear, coordinada por D. José Gregorio Sánchez Cabañero.

Nuestro agradecimiento al Instituto Geográfico Nacional por las facilidades prestadas para la consulta de la base de datos de la Red Sísmica Nacional, y particularmente a Juan Rueda por su colaboración y ayuda.

Los autores agradecer a L. Rivera y A. Cisternas, J.C. Lee y J. Angelier; y a Z. Reches por permitirnos la utilización en este trabajo de sus programas informáticos.

#### Referencias

- Angelier, J. y Mechler, P. (1977). *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 7 (19): 1309-1318.
- Delouis, B.; Haessler, H.; Cisternas, A. y Rivera, L. (1993). *Tectonophysics*, 221: 413-437.
- De Vicente, G. (1988). *Tesis Doctoral*. Fac. CC. Geológicas, U.C.M., Madrid, 200 pp.
- De Vicente, G.; González Casado, J.M.; Muñoz-Martín, A.; Giner, J.L. y Rodríguez Pascua, M.A. (1996) En.: *Tertiary basins in Spain*. Univ. Cambridge Press. Cambridge. pp: 255-259.
- De Vicente, G.; Giner, J.L.; Muñoz-Martín, A.; González Casado, J.M. y Lindo R. (en prensa) *Tectonophysics*.
- Medina, F. (1995). *J. Struct. Geol.*, vol 17, n° 7, 1035-1046
- Giner, J.L. *Tesis doctoral*, 300 pp., inédito.
- Herraiz, M.; De Vicente, G.; Lindo, R. y Sánchez-Cabañero, J.G. (en prensa) *Tectonophysics*.
- I.G.N. (1994) Petición datos del banco de datos de sismicidad (09-02-94)
- I.G.N. (1993) Boletín de sismos próximos, 1990.
- Klein, F.W. (1978) *Geol. Surv. Open-File Rep. (U.S.)*, 78 (694): 1-113.
- Lee, J.C. y Angelier, J. (1994) *Computers & Geosciences*, vol 20, n° 2: 161-191.
- Racero, (1988) *II Congreso Geológico de España*, Granada.
- Reches, Z. (1983). *Tectonophysics*, 95: 133-156.
- Reches, Z.; Baer, G. y Hatzor, Y. (1992). *J. Geoph. Res.*, vol 97, n° B9, 12481-12493.
- Ribeiro, A.; Batista, R.; Cabral, J.; Matias, L. (1994) *Abstract. Annales Geophysicae*, Supp. I, vol. 12, part I, p. C70.
- Rivera, L.A. (1989). *Thèse de Doctorat*. Université Louis-Pasteur de Strasbourg; 266 pp.
- Rivera, L.A. y Cisternas, A. (1990). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 80(3), 600-614.
- Van Wees, J.D. (1994) *Tesis doctoral*. Fac. of Earth Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam, 164 pp.
- Van Wees, J.D.; Cloetingh, S. y De Vicente, G. (1995) *Geol. Soc.*, Special Publication n° 99
- Zoback, M.L. (1992) *J. Geophys. Res.*, 97: 11703-11728.