

Sismicidad y tectónica en el área de Becerreá – Triacastela (Lugo, NO España)

Seismicity and tectonics in Becerreá-Triacastela's area (Lugo, NW Spain)

C. López-Fernández ⁽¹⁾, J. A. Pulgar ⁽¹⁾, J. Gallart ⁽²⁾, J.M. Glez-Cortina ⁽¹⁾, J. Díaz ⁽²⁾ y M. Ruíz ⁽²⁾

⁽¹⁾ Dpto. de Geología, Univ. de Oviedo, C/ Arias de Velasco s/n 33005 Oviedo, clopez@geol.uniovi.es

⁽²⁾ Dpto. de Geofísica, I. Jaime Almera, CSIC – Barcelona.

ABSTRACT

The most active seismic spot in the northwestern part of the Iberian Peninsula is located between Becerreá and Triacastela (Lugo). Since 1995 an apparent increase of the activity has taken place: several seismic events took place, which included twenty earthquakes of the magnitude > 4 and a main event of magnitude 5.3 (21 May 1997). Most recently, a permanent low-magnitude activity (5-10 events/month) is registered in this zone.

Lack of suitable seismic information prevents any rigorous analysis of this activity and its origin. We undertook a detailed study of the local seismicity between 1999 and 2002, based on the deployment of a temporary seismic array (GASPI Project). The integration of the new seismic data and the geologic information has allowed to obtain an updated image of the seismicity of this zone and to identify the Becerreá fault like the main seismogenetic source.

Key words: Falla de Becerreá, Triacastela, sismicidad, Proyecto GASPI

Geogaceta, 36 (2004), 51-54
ISSN:0213683X

Introducción

En el área localizada entre las poblaciones de Becerreá y Triacastela (Lugo) se localiza el foco sísmico con mayor actividad de todo el noroeste de la Península Ibérica. En las dos últimas décadas se han registrado instrumentalmente en esta zona más de 250 terremotos (Fig. 1). Durante las crisis sísmicas ocurridas en los años 1979, 1995, 1996 y 1997 se detectaron más de 20 eventos con magnitud > 4, culminando la serie de 1997 con un evento principal de magnitud mb 5.3 e intensidad VII (EMS) en la zona epicentral. Actualmente se registra en la zona una actividad media de 5-10 sísmos/mes.

La caracterización de esta sismicidad y la identificación de su origen ha planteado una compleja problemática: es significativamente elevada y anómala dentro del contexto regional, no es fácilmente asociable a ninguna estructura geológica, y la información sísmica previa es muy reducida. Los estudios realizados hasta el momento (Capote *et al.*, 1999; Rueda y Mezcua, 2001 y Martínez-Díaz *et al.*, 2002) han planteado diversas hipótesis, en ocasiones contrapuestas. Estos trabajos se basan en los datos suministrados por la Red Sísmica Nacional que, como se discutirá posteriormente, carecen en general de la precisión necesaria para realizar análisis sismotectónicos de detalle.

En este trabajo se presentan los principales resultados obtenidos a partir de los nuevos

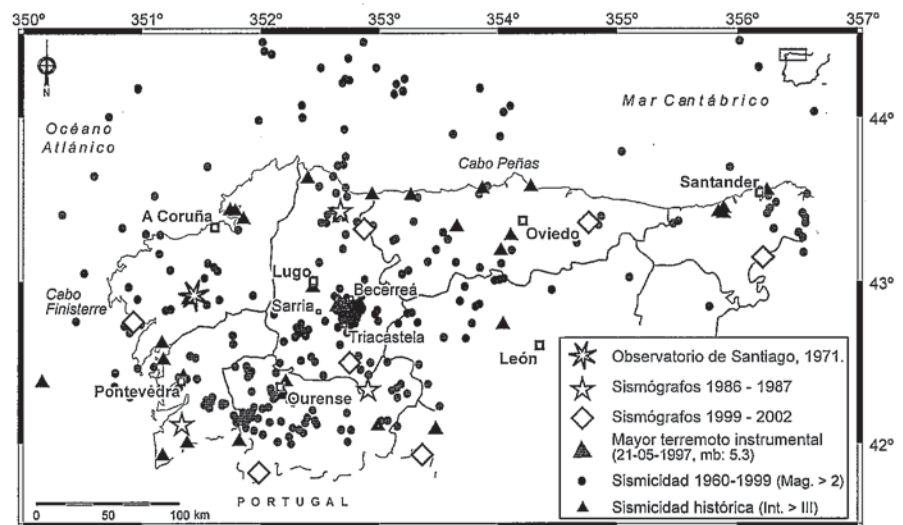


Fig. 1.- Sismicidad histórica e instrumental (1960-1999) y Red Sísmica Nacional Española (IGN) en el NO de la Península Ibérica. Datos sísmicos: Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Fig. 1.- Historic and instrumental seismicity (1960-1999) and Spanish Seismic Network (IGN) in the northwest part of the Iberian Peninsula. Seismic data: IGN catalogue.

datos de sismicidad adquiridos, entre los años 1999 y 2002, en el marco del Proyecto GASPI y se propone una nueva hipótesis sobre el origen de esta actividad.

Marco tectónico

Geológicamente, la zona de estudio se sitúa en el límite entre la Zona Asturoccidental-Leonesa y la Zona Centroibérica. Se

caracteriza por la presencia de materiales, pertenecientes al Paleozoico Inferior y, en menor medida, al Precámbrico que aparecen intensamente plegados y fracturados (Fig. 2). Sobre estos materiales se encuentran, discordantes, pequeñas cuencas terciarias que indican una actividad tectónica reciente. Entre ellas, destacaríamos por su extensión la de Sarria, situada al oeste de la zona de estudio.

Las estructuras más significativas son grandes pliegues anticlinales y sinclinales con orientación NNO-SSE, isoclinales, de eje subhorizontal y vergentes al Este (Marcos, 1973), así como los sistemas de fallas NE-SO (Fig. 2), que presentan fuertes buzamientos, próximos a la vertical (Capote *et al.*, 1999; González-Casado *et al.*, 2000; Martínez-Díaz *et al.*, 2002). La estructura de mayor relevancia es la Falla de Becerreá, la cual presenta un trazado cartográfico superior a 40 km según una orientación N300 y un buzamiento de aproximadamente 70° hacia el SE. El movimiento principal observado de esta estructura ha sido de desgarre sinistral.

Trabajos recientes (González-Casado y Giner, 2000; Herraiz *et al.*, 2000; Rueda y Mezcuza, 2001), realizados a partir de estudios de población de fallas y de datos de sismicidad, apuntan a una compresión general en dirección NO-SE en el sector noroeste de la Península Ibérica.

Sismicidad instrumental: 1979-2002

Los primeros datos de actividad en el área comprendida entre las localidades de Sarria, Becerreá y Triacastela corresponden a los sismos de magnitud 3.9, 4.1 y 4.6 ocurridos el año 1979, no habiendo sido documentado ningún terremoto histórico en la zona. A partir de 1995 (año hasta el que únicamente se detectaron algunos eventos esporádicos) se ha producido un marcado incremento de la actividad. Entre 1995 y 1996 se ocasionaron varias crisis sísmicas, registrándose más de 200 sismos, cuatro de los cuales alcanzaron magnitud 4. El

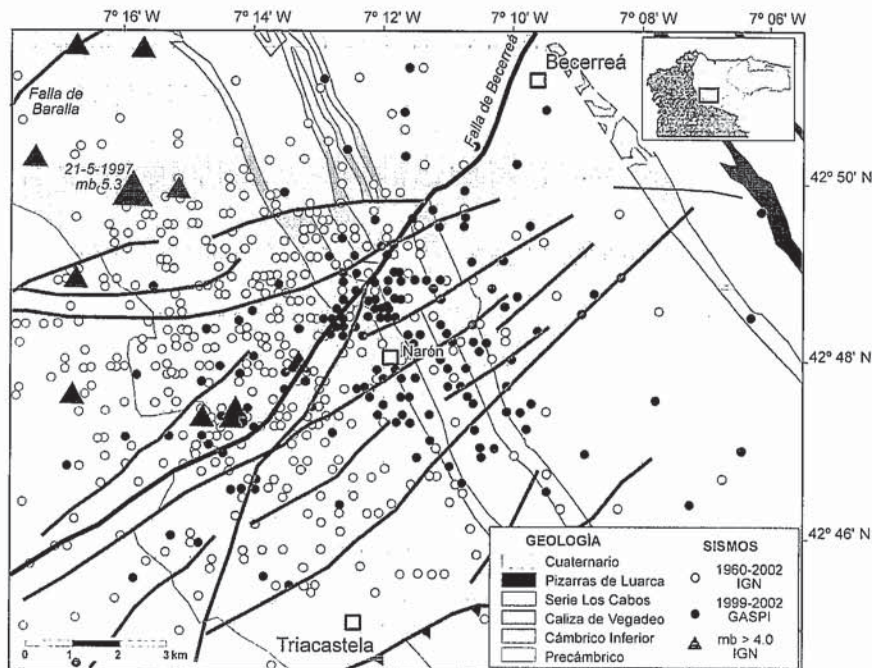


Fig. 2.- Sismicidad instrumental en el área localizada entre Becerreá y Triacastela. Datos sísmicos: catálogo IGN (1960-1999) y catálogo GASPI (1999-2002). Geología: modificada IGME.

Fig. 2.- Instrumental seismicity in the area between Becerreá and Triacastela. Seismic data: IGN catalogue (1960-1999) and GASPI catalogue (1999-2002). Geology: modified from IGME.

año 1997 constituye el punto de mayor actividad, al desencadenarse nuevas crisis sísmicas que culminaron un terremoto principal de magnitud $m_b = 5.3$, el 21 de mayo de 1997. Su hipocentro se localizó a 9 km de profundidad al oeste de Becerreá. Durante los días posteriores se registraron más de un centenar de réplicas (magnitud > 2), varias de las cuales alcanzaron magnitudes superiores a 4. A partir de

1998 la sismicidad se ha estabilizado en unos niveles constantes (5-10 sismos/mes), aunque sensiblemente superiores a los registrados anteriormente a 1995.

En total, durante el periodo 1979-1999, han sido catalogados en la zona por la Red Sísmica Nacional más de 250 terremotos (Fig. 2). En todo caso, es necesario tener presente que el registro instrumental no ha sido uniforme en el tiempo, dado que las características de la red permanente y el número de sismógrafos han sufrido diversas mejoras y modificaciones. Así, se estima que hasta los años 1986-87, en que se incrementó hasta cuatro el número de estaciones de registro, el umbral de detección sísmica fue de magnitud 3.0-3.5, situándose desde entonces en valores 1.8-2.0.

Entre los años 1999 y 2002, en el marco del Proyecto GASPI (López-Fernández *et al.*, 2002), se desplegó una red sísmica temporal compuesta por 18 estaciones portátiles (Fig. 3), que se mantuvieron operativas de forma continua durante 34 meses. Fueron utilizados tres modelos de sismógrafos diferentes: Reftek, Lennartz Marslite y Lennartz Mars88, equipados con geófonos de 5 y 20". Doce estaciones registraron en modo continuo mientras que seis emplearon un algoritmo de detección.

Para la lectura de las fases sísmicas se utilizó el programa SAC2000 (Seismic Analysis Code, University of California). Los hipocentros fueron determinados mediante el programa HYPO-71 (Lee y Lahr, 1975), empleando un modelo cortical estructurado en 4 capas sobre un manto homogéneo (Capa 1: 0-3 km, $V_p=5.5\text{km/s}$; Capa 2: 3-12.5 km, $V_p=6.0\text{km/s}$;

N	Fecha	Eventos	Duración secuencia	Magnitud sismos
1	20 junio 1999	4	1h 38'	2.9 - 1.9 - 2.0 - 2.3
2	28 junio 1999	4	3h 45'	2.2 - 2.5 - 2.4 - 2.7
3	1 agosto 1999	7	1h 09'	2.5 - 2.0 - 3.5 - 3.1 - 2.6 - 2.7 - 2.5
4	30 enero 2000	3	5'	3.1 - 2.6 - 1.8
5	25 febrero 2000	5	1h 55'	2.2 - 3.2 - 2.6 - 2.6 - 2.7
6	23 marzo 2000	3	8'	2.4 - 2.3 - 2.4
7	22 abril 2000	4	7'	2.8 - * - * - 2.3
8	7 septiembre 2000	5	58'	2.5 - * - 2.2 - 2.2 - 2.0
9	12 septiembre 2000	6	2h 42'	2.1 - 2.1 - 2.4 - * - 2.1 - 2.4
10	18 octubre 2000	5	2h 58'	2.5 - 2.6 - * - 2.1 - 2.2
11	26 octubre 2000	4	14'	2.4 - 1.8 - 2.3 - 2.4
12	5 enero 2001	5	1h 34'	3.1 - 2.2 - 3.0 - 2.6
13	10 abril 2001	5	1h 02'	3.1 - * - 2.2 - 3.0 - 2.6
14	9 junio 2001	3	14'	2.1 - 2.4 - 1.9
15	6 diciembre 2001	3	37'	2.2 - 2.7 - 2.0

Tabla I.- Series sísmicas identificadas al SO de Becerreá en el periodo 1999-2002.

Tabla I.- Identified seismic series to SW of Becerreá between 1999 and 2002.



Fig. 3.- Red sísmica temporal (Proyecto GASPI) desplegada en el noroeste peninsular entre 1999 y 2002.

Fig. 3.- Temporary seismic array (GASPI Project) setup between 1999 and 2002 in the NW of the Iberian Peninsula.

Capa 3: 12.5-22 km, $V_p=6.2$ km/s; Capa 4: 22-38 km, $V_p=6.7$ km/s; Velocidad Manto=8.0 km/s, establecido a partir de los perfiles sísmicos existentes (Córdoba et al., 1987; Pulgar et al., 1996; Fernández-Viejo et al., 1998, 2000;). Las magnitudes de los eventos fueron calculadas a partir de su duración, aplicando la fórmula propuesta por Lee & Lahr (1975): $FMAG=0.87 + 2\log(T) + 0.0035D$.

Tras desechar los eventos de origen artificial y considerando únicamente aquellas localizaciones con un rms < 0.3, fueron catalogados, en el área comprendida entre Sarria, Becerreá y Triacastela, 185 terremotos (Fig. 2). Durante el mismo periodo la Red Sísmica Nacional registró 64 eventos. Los errores máximos de localización se estiman en 1-2 km en la componente epicentral y 2-3 km en la profundidad. La sismicidad media se situó en 5 sismos / mes, registrándose los máximos de actividad en junio de 1999 y en septiembre de 2000, durante los cuales se registraron hasta 15 terremotos. Se ha estimado que el umbral mínimo de detección de la red temporal en la zona de estudio se ha situado en una magnitud 1.6.

La magnitud media de los sismos detectados osciló entre 2 y 3, superando dicho valor únicamente nueve eventos. El mayor terremoto (01-08-1999) alcanzó una magnitud 3.5. La totalidad de los sismos se localizaron a menos de 12 km de profundidad, principalmente entre los 0 y 8 km (Fig. 4). Si bien, la mayoría de los eventos se produjeron de forma aislada y esporádica (grupos de 2-3), también se registraron 15 pequeñas crisis sísmicas (Tabla I).

La mayor concentración de epicentros se produce al SO de Becerreá, entre los $7^{\circ} 10'$ y los $7^{\circ} 13'$ O, y los $42^{\circ} 47'$ y $42^{\circ} 49'$ N (Fig. 2). La comparación entre los catálogos de sismicidad previos y los nuevos datos permite observar un desplazamiento hacia el oeste de los epicentros de los sismos detectados por la Red Sísmica Nacional respecto a los determinados mediante la red temporal. El reducido número de sismógrafos que integraban la red permanente, así como su ubicación geográfica, han incidido en que la localización hipocentral de los eventos presente un error sistemático de varios kilómetros hacia el oeste.

Otro de los principales objetivos del estudio realizado fue la determinación de nuevos mecanismos focales que permitieran conocer el estado actual de esfuerzos en la zona noroeste. Los únicos estudios previos existentes corresponden a Herraiz et al. (2000) y Rueda y Mezcuca (2001), significativamente coincidentes con los resultados alcanzados en el presente trabajo.

El método empleado en la determinación de los mecanismos fue el de la polaridad de la onda P, efectuándose los cálculos a través de dos vías: gráfica e informática. Para ello se utilizó el software FPFIT (Reasenber & Oppen-

heimer, 1985). En algunos casos, dado el reducido número de lecturas disponibles, se recurrió a la determinación de mecanismos compuestos, empleando grupos de sismos lo más consistentes posibles.

En total fueron obtenidas 10 nuevas soluciones focales cuyos parámetros hipocentrales quedan recogidos en la Tabla II y cuya representación gráfica se incluye en la Figura 4a.

Interpretación sismotectónica

Las principales hipótesis previas apuntaban a la Falla de Baralla (situada más al NO,

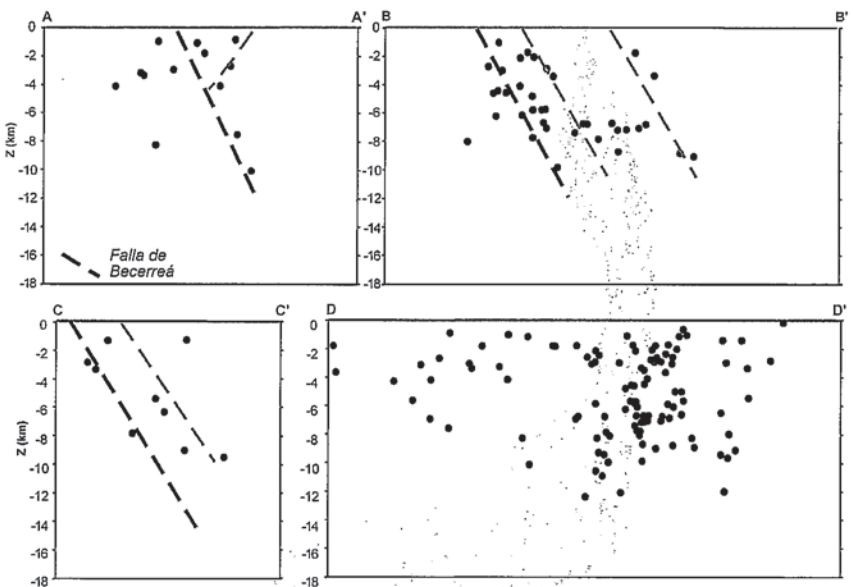
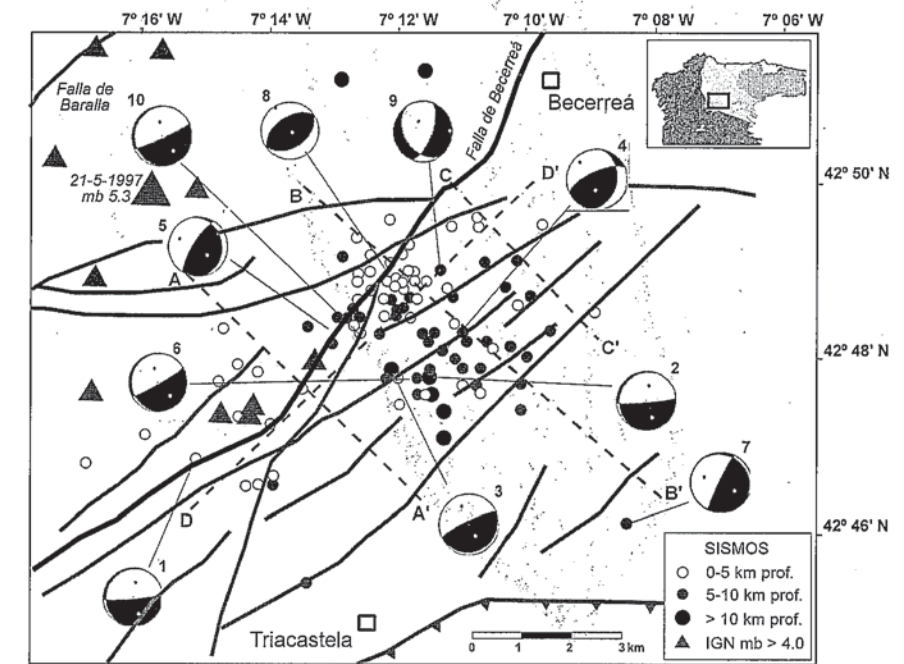


Fig. 4.- (a) Selección de sismos con alta precisión en su determinación hipocentral. Distribución en profundidad de la actividad a lo largo de (b, c, d) perfiles transversales a las principales estructuras y (d) según un perfil longitudinal a la Falla de Becerreá.

Fig. 4.- (a) Selection of well-located earthquakes. (b, c, d) Depth profiles normal to the NE-SW and (d) along Becerreá Fault with the earthquakes distribution.

Ev.	Fecha	Tiempo origen	Longitud °O	Latitud °N	Prof. km	MAG	NL	Plano nodal A			Plano nodal B			Eje P		Eje T	
								Azm	Dip	Rake	Azm	Buz	Rake	Azm	Dip	Azm	Dip
1	19-09-1999	02:44	7° 15.33	42° 47.07	2.27	2.0	5	80	75	-180	330	90	-15	284	11	16	11
2	20-06-1999	04:44	7° 11.67	42° 47.78	10.57	2.9	9	85	85	-80	201	11	-153	6	49	166	39
3	01-08-1999	05:08	7° 12.17	42° 47.97	7.84	3.5	7	85	10	90	245	80	90	335	35	155	55
4	01-08-1999	05:10	7° 11.65	42° 48.09	8.14	3.1	6	10	35	40	245	68	118	315	19	194	57
5	14-08-1999	11:09	7° 13.56	42° 48.52	7.37	2.6	6	350	20	50	212	75	103	291	29	140	58
6	Comp. 1		7° 12.32	42° 47.94	7.00	2.7	14	60	85	-80	176	11	-153	341	49	141	39
7	99-09-1999	19:57	7° 08.65	42° 46.24	9.4	2.4	6	205	85	100	321	11	27	286	39	126	49
8	Comp. 2		7° 12.19	42° 49.04	2.80	3.2	8	55	40	-90	235	50	-90	145	85	325	5
9	03-05-2000	23:43	7° 11.49	42° 49.14	8.21	2.6	6	20	65	-60	146	38	-137	333	59	89	15
10	07-09-2000	08:24	7° 13.10	42° 48.30	7.43	2.5	7	65	86	-80	181	11	-153	346	49	146	39

MAG: Magnitud, NL: Número lecturas
Comp 1: 199909111913 - 199909112101
Comp 2: 20002250202 - 20002250204

Tabla II.- Parámetros hipocentrales de los mecanismos focales calculados.

Tabla II.- Focal parameters of the calculated mechanisms.

fuera de la zona de estudio) como posible fuente sismogénica (Capote *et al.*, 1999), apuntando Martínez-Díaz *et al.* (2002) un posible mecanismo de triggering como reactivador de dicha falla para explicar las crisis sísmicas de los años 1995-1997. Rueda y Mezcua (2001) plantearon, para justificar esta sismicidad, la existencia en profundidad de una estructura no aflorante, que transcurriría bajo el manto de Mondoñedo en dirección NE-SO y que giraría en esta zona hasta orientarse NO-SE.

Para obtener una imagen sísmica más precisa de la zona fueron seleccionados 94 eventos con una alta precisión en su localización (GAP < 200, RMS < 0.15 y Calidad HYPO-71 > C), que fueron representados en la Figura 4a sobre el esquema geológico de la zona, junto con los nuevos mecanismos focales calculados. La proyección en profundidad de los sismos seleccionados a lo largo de tres perfiles NO-SE, perpendiculares a las fallas NE-SO (Fig. 4b, c, d), y de uno paralelo a la Falla de Becerreá, en dirección NE-SO (Fig. 4e), ha revelado algunos aspectos de interés. En los perfiles ortogonales a las estructuras NE-SO se observa un buzamiento hacia el SO en la disposición general de los eventos. Por el contrario, en el perfil paralelo a las mismas, se aprecia una nube dispersa de hipocentros a lo largo de lo que podría ser un plano de falla. La totalidad de los eventos se distribuyen hasta los 12 km de profundidad, que probablemente constituye la zona de transición frágil-dúctil, límite inferior de la denominada 'capa o nivel sismogénico'.

A partir de los datos disponibles es posible apuntar a la Falla de Becerreá y fallas asociadas como posible fuente sismogénica. Los eventos registrados en las estructuras próximas tendrán su origen en los reajustes estructurales necesarios para acomodar el movimiento de la principal. Dicha falla, también muestra actividad en otros segmentos de su trazado, al NE de la zona estudiada. La intersección de la Falla de Becerreá con

otras estructuras NE-SO podría generar, asimismo, una zona de debilidad estructural añadida que favorezca, aún en mayor medida, la ocurrencia de una actividad sísmica continuada. Es conocido que las zonas de intersección de fallas son regiones altamente favorables para la concentración de esfuerzos, caracterizadas por presentar una alta facturación y circulación de fluidos, donde la liberación de la energía acumulada se refleja en una continuada actividad sísmica de baja magnitud (Talwani, 1999).

Los mecanismos focales predominantes (Tabla II; Fig. 4a) son consistentes con movimientos de falla inversa (planos nodales sub-verticales NNE-SSO) y de falla de desgarre sinistral, si bien la mayor parte de las soluciones presentan un carácter mixto entre ambos tipos. En todos los casos, uno de los planos nodales (asociado a la falla reconocida en superficie) presenta una orientación NE-SO, con ejes de presión con orientación NO-SE y con una inclinación entre 0 y 40°.

Conclusiones

El estudio desarrollado entre 1999 y 2002 (Proyecto GASPI) ha permitido obtener una imagen más precisa de la actividad generada en el mayor foco sísmico del noroeste peninsular, al SO de Becerreá (Lugo), donde actualmente se registra una actividad permanente y continuada, aunque de baja magnitud.

El análisis de los nuevos y precisos datos sísmicos ha permitido apuntar a la Falla de Becerreá como principal fuente sismogénica. Asimismo, la existencia de una zona de debilidad estructural, causada por la intersección de la misma con otras estructuras NE-SO, podría suponer un factor añadido en la generación de la actividad sísmica detectada.

Los mecanismos focales calculados, que indican movimientos de falla inversa y de falla de desgarre sinistral, son plenamente coherentes con un estado actual de compresión NO-SE en la región noroeste de la Península Ibérica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco de los proyectos 'GASPI' (AMB98-1012-CO2-02) y 'MARCONI' (REN2001-1734-CO3-02/MAR). Carlos López agradece la financiación aportada por el programa 'Formación de Personal Investigador' del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España.

Referencias

- Capote, R., Martínez-Díaz J.J., Villamar, P. y Tsige, M. (1999): I Asam. *Hisp. Portug. Geod. y Geof.*, Almería. Volumen: CDROM ISBN:84-95172-10-0
- Córdoba, D., Banda, E. and Ansonge, J. (1987): *Tectonophysics*, 132, 321-333.
- Fernández Viejo, G., Gallart, J., Pulgar, J.A., Gallastegui, J., Dañobeitia, J.J. and Córdoba, D. (1998): *Geophysical Research Letters*, 25, 4249-4252.
- Fernández Viejo, G., Gallart, J., Pulgar, J.A., Gallastegui, J., Dañobeitia, J.J. and Córdoba, D. (2000): *Journal of Geophysical Research*, 105, 3001-3018.
- González-Casado, J.M. y Giner Robles J. (2000): *Geogaceta*, 28, 71-74.
- Herrera, M., De Vicente, G., Lindo-Ñaupari, 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): *Tectonics*, 19, 762-786.
- Lee, W.H.K. and Lahr, J.C. (1975): *U.S. Geol. Survey, Open File Rep.*, 75-311.
- López-Fernández, C., Pulgar, J.A., Gallart, J., González-Cortina, J.M., Díaz, J. y Ruiz, M. (2002): *III Asam. Hisp. Portug. Geod. y Geof.*, Valencia, 395-399.
- Marcos, A. (1973): *Trabajos Geol.*, Univ. Oviedo, 6, 1-113.
- Martínez-Díaz, J.J., Capote, R., Tsige, M., Martín-González, F., Villamor, P. y Insua, J.M. (2002): *Rev. Soc. Geol. España*, 15(3-4), 195-209.
- Pulgar, J.A., Gallart, J., Fernández-Viejo, G., Pérez-Estaún, A., Álvarez-Marrón, J. and ESCIN Group (1996): *Tectonophysics*, 264, 1-19.
- Reasenber, P. and Oppenheimer, D. (1985): *U.S. Geol. Survey, Open File Rep.*, 85-739.
- Rueda, J. y Mezcua, J. (2001): *Instit. Geogr. Nac., Pub. Téc.* 35. Madrid.
- Talwani, P. (1999): *Tectonophysics*, 305, 371-379.
- Udías, A. y Buforn, E. (1985): *Mecanismo focal de los terremotos y sismotectónica de la región Ibero-Mogrebí*. En *Mecanismo de los terremotos y tectónica*. Eds. A. Udías, D. Muñoz y E. Buforn. Editorial Universidad Complutense de Madrid, 217-224.