

Definición de zonas sismogénicas en base al gradiente geotérmico, resistencia y profundidad del límite frágil-dúctil en la corteza superior. Aplicación metodológica para el cálculo de la peligrosidad sísmica en el Sureste de España

Seismogenic zoning based on the geothermal gradient, strenght and depth of the fragile-ductile transition in the upper crust. Methodological approach for seismic hazard calculations in southeast Spain

J. García-Mayordomo ⁽¹⁾ y J.L. Giner-Robles ⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Geodinámica. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, Ciudad Universitaria s/n, 28040, Madrid. jmayordomo@geo.ucm.es, insuarev@geo.ucm.es

⁽²⁾ Departamento de Matemática Aplicada y Métodos Informáticos, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica, c/Ríos Rosas, 21, 28003, Madrid. jginer@geo.ucm.es

ABSTRACT

In this work we present a methodological approach to define seismogenic zones for seismic hazard analysis based on the relationships which can be drawn from the geothermal gradient, total strength of the upper crust and the depth of the fragile-ductile transition, and their relation with the mean focal depth and a parameter hereby defined: Seismic Density Index (number of events per km³ x 1000). A revision of the deep geophysical data available in SE Spain has led to the definition of 6 distinctive crustal blocks. Two main types of crustal blocks are identified: hot-and-weak and cold-and-strong. Hot-and-weak blocks show consistently higher geothermal gradients, lower strengths and shallower fragile-ductile depths than cold-and-strong blocks. Furthermore hot-and-weak blocks show higher seismic density indexes and shallower mean focal depths. However, two blocks biased from this relationship and so are called anomalous. According to these results four seismogenic zones can be defined in SE Spain. The a and b parameters of the Gutenberg-Richter law of each zone are consistent with the thermal and strength properties of the blocks. Zones based on the hot-and-weak blocks show higher a and b values than the cold-and-strong ones, while the anomalous blocks show values in between these extremes.

Key words: Seismic hazard, crust, rheology, SE Spain, Betics.

Geogaceta, 39 (2006), 55-58
ISSN: 0213683X

Introducción

La identificación y caracterización de las fuentes sismogénicas que pueden afectar a un determinado emplazamiento constituye el primer paso en la realización de un análisis de la peligrosidad sísmica (Reiter, 1990). Las fuentes sismogénicas superficiales ($h < 30$ km) pueden clasificarse básicamente en dos tipos: zonas y grandes fallas. Las primeras representan la proyección en superficie de un volumen de corteza donde se admite que la ocurrencia de sismicidad es equiprobable en el espacio, poissoniana en el tiempo y, además, donde los tamaños de los terremotos se distribuyen de acuerdo a la ley de Gutenberg-Richter (exponencialmente). La ocurrencia de sismicidad está controlada por roturas en las fracturas que conforman el conjunto de los sistemas de fallas que se localizan en el interior del volumen cortical. Las grandes fallas son estructuras tectónicas singulares donde se concentra la deformación y, por tanto, la ocurrencia de grandes terremotos con desplaza-

mientos efectivos mesurables en superficie. El tamaño del terremoto máximo viene dado por las dimensiones máximas de la rotura frágil que la falla podría producir (Aki, 1966) y, la recurrencia temporal media de tal evento, por la tasa de deslizamiento que puede medirse sobre la falla (Wesnousky, 1986). A efectos prácticos, en la mayoría de los estudios de peligrosidad sísmica que no atañen la seguridad de infraestructuras críticas, solamente tienen interés grandes fallas cuya recurrencia del evento máximo pueda estimarse en menos de 10.000 años. Recientemente se ha realizado un estudio donde se han identificado y caracterizado las zonas sismogénicas y grandes fallas del Sureste de España (García-Mayordomo, 2005). En este trabajo se sintetiza la metodología empleada en la definición de las zonas sismogénicas.

Metodología

La definición de zonas sismogénicas en los estudios de peligrosidad sísmica se realiza

generalmente a partir de la correlación que encuentra el analista entre la distribución espacial de los epicentros sísmicos y la situación de las grandes unidades geotectónicas en que pueda dividirse un territorio. Este procedimiento adolece de una fuerte subjetividad, siendo lo normal que cada analista defina las zonas sismogénicas en base a sus propios criterios. De este modo resultan, para una misma región, modelos de zonas sismogénicas muy diferentes en número, tamaño y geometría. Este efecto conduce a obtener resultados finales de peligrosidad muy diferentes para un mismo emplazamiento (cf. Giner *et al.*, 2002). Para evitar esta incertidumbre la definición de zonas sismogénicas debería estar basada en datos objetivos y parámetros físicos relacionados con la ocurrencia de sismicidad.

La ocurrencia de sismicidad, y su distribución en profundidad, están relacionadas con la reología, resistencia y gradiente geotérmico de la corteza (Sibson, 1983 y 1984; Meissner y Wever, 1986; Chen, 1988; entre otros). De modo simplificado se puede

admitir que en regiones con valores altos de flujo térmico (e.g.: 80 mW/m²) la tasa de ocurrencia de sismicidad será previsiblemente mayor, pero de magnitudes menores y localizada a profundidades más someras, que en regiones de flujo térmico bajo (e.g.: 40 mW/m²). La validez de esta relación se apoya en la relación que guarda el flujo térmico con la resistencia de la corteza superior. Valores altos de flujo térmico implican, por lo general, un gradiente geotérmico así mismo alto y, por tanto, una reducción de la resistencia total de la corteza superior al somerizarse el límite de deformación frágil-dúctil (o pico de resistencia frágil). En teoría, al situarse el límite frágil-dúctil más cerca de la superficie, la profundidad media de la sismicidad, que ocurre en su gran mayoría en el interior de la corteza superior frágil, se reduce, y, por otra parte, al reducirse el valor del pico de resistencia, la magnitud de los terremotos máximos posibles se reduce. Concretamente en este trabajo se estudiarán las relaciones entre: a) el gradiente geotérmico, b) la resistencia total de la corteza superior y, c) la profundidad de la transición entre los dominios de deformación frágil y dúctil, con: 1) la profundidad media de los terremotos y, 2) un parámetro definido en este estudio: el Índice de Densidad Sísmica, número de eventos sísmicos por km³ multiplicado por 1000.

Para calcular estos parámetros es necesario, en primer lugar, descomponer el territorio en una serie de volúmenes de corteza (bloques) en los que pueda admitirse una estructura cortical uniforme con propiedades geofísicas homogéneas. El criterio básico para la identificación de los bloques corticales reside en el análisis de las variaciones laterales de la estructura cortical y sus propiedades a lo largo de la zona de trabajo. Cada bloque cortical debe quedar finalmente definido por el número de capas que componen la corteza, y, por el espesor, litotipo composicional, conductividad térmica y producción radiogénica en cada una de ellas. A partir de todo este conjunto de datos puede construirse la geoterma (Roy *et al.*, 1968) y el perfil reológico (cf. Ranalli, 1995) y, finalmente, obtener el gradiente geotérmico, resistencia de la corteza superior y profundidad del límite frágil-dúctil en cada bloque cortical.

Posteriormente se estudia la distribución en profundidad de la sismicidad. Para ello debe prestarse especial atención a la calidad de las determinaciones focales, por ejemplo: considerando únicamente registros con errores de localización vertical menores o iguales a 2 km. A partir de esta muestra se puede estimar la profundidad media de la sismicidad contenida en la corteza superior frágil de cada bloque, y, así mismo, a partir del número de eventos contenidos en ésta, el Índice de Densidad Sísmica.

Finalmente, se definen las zonas sismogénicas como aquellos bloques, o conjuntos de bloques, que presentan valores y relaciones similares entre los parámetros corticales y sísmicos. En los bloques relativamente más calientes y blandos el parámetro *b* de Gutenberg-Richter, así como el parámetro de actividad sísmica (*a*), deberían ser mayor que en los bloques relativamente más fríos y resistentes.

Estructura de la corteza en el SE de España (Cordilleras Béticas Orientales)

El Sureste de España queda comprendido fundamentalmente dentro del dominio geotectónico de las Cordilleras Béticas Orientales. Este territorio ha sido objeto de numerosos estudios geofísicos de carácter profundo (Banda y Ansoorge, 1980; Gallart *et al.*, 1990; Banda *et al.*, 1993; García-Dueñas *et al.*, 1994; Zeyen *et al.*, 1995; Carbonell *et al.*, 1997; Vidal *et al.*, 1997; entre otros) que han puesto de manifiesto la ocurrencia de bruscos cambios laterales en el espesor, estructura y composición de la corteza. De modo muy resumido puede considerarse la existencia de dos grandes dominios corticales: Ibérico y Bético. La corteza de tipo Ibérico se caracteri-

za por presentar una estructura bien definida compuesta por tres capas que en su prolongación hacia el Surco Valenciano experimenta un importante adelgazamiento, y, por otra parte, en su prolongación hacia el interior del orógeno Bético pierde su estructura tri-capa y se produce el paso a la corteza de tipo Bético. La corteza de tipo Bético se caracteriza por presentar una estructura bi-capa con un máximo espesor localizado aproximadamente en la parte central del orógeno a partir del cual experimenta un brusco adelgazamiento en dirección hacia el Mar de Alborán y Cuenca Surbaleare acompañado de un importante gradiente positivo del flujo térmico (Fernández *et al.*, 1998). Una discusión más extensa y detallada sobre las características de ambos tipos de corteza, y la influencia ejercida por las grandes fallas y accidentes tectónicos del Sureste de España se encuentra en García-Mayordomo (2005).

Definición de Bloques Corticales

A partir del análisis de toda la información geofísica disponible, y de su interpretación en relación con las grandes fallas de las Béticas Orientales se ha establecido la existencia de 6 bloques corticales (Fig. 1a). En la

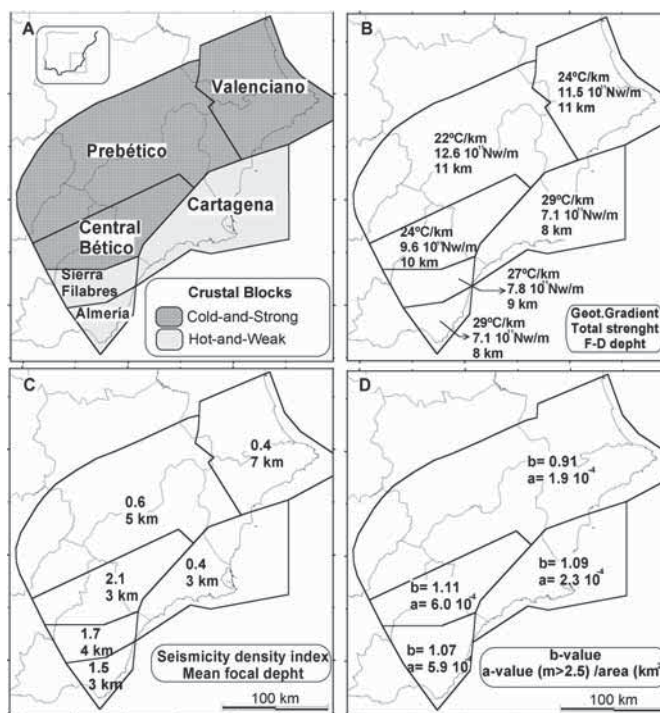


Fig. 1.- Bloques corticales del SE de España: a) Localización y clasificación de los bloques, b) gradiente geotérmico y resistencia total de la corteza superior, y profundidad del límite frágil-dúctil, c) Índice de Densidad Sísmica y profundidad media de la sismicidad, d) valores de los parámetros *b* y *a* de Gutenberg-Richter.

Fig. 1.- Crustal blocks in SE Spain: a) types of blocks, b) geothermal gradient, total strength of the upper crust and depth of the fragile-ductile limit, c) seismicity density index and mean focal depths, d) *b* and *a* Gutenberg-Richter values.

figura 2 se muestran las geotermas y perfiles reológicos de cada uno de los bloques. Los parámetros empleados en la construcción de los perfiles se resumen en las tablas I y II para los bloques del Dominio Cortical Ibérico y Bético, respectivamente. En la figura 1b se muestran los valores del gradiente geotérmico, resistencia total de la corteza superior y profundidad de la transición frágil-dúctil obtenidos en cada uno de ellos.

Se constata que existe una relación inversa entre el gradiente geotérmico, la resistencia de la corteza superior y la profundidad del límite frágil-dúctil. Es decir, a mayor gradiente geotérmico menor resistencia de la corteza superior y menor profundidad del límite frágil-dúctil, y viceversa. Los bloques más calientes y menos resistentes se localizan en la parte interna del Orogéno Bético, mientras que los más fríos y resistentes se localizan en la parte externa.

Obsérvese como la composición fuertemente básica de la corteza inferior del Bloque de Cartagena (Tabla II) le confiere una gran resistencia, a pesar de presentar un alto gradiente geotérmico (Fig. 2). Esta configuración reológica es clave para entender la evolución geodinámica de las Béticas Orientales desde el Neógeno en adelante, pero su discusión queda fuera del contexto de la presente comunicación. Las características de la actividad sísmica que tiene lugar en el Bloque de Cartagena dependen fundamentalmente de las propiedades de su corteza superior.

Relaciones con la sismicidad del Sureste de España

Aproximadamente el 90% de la sismicidad contenida en los diferentes bloques corticales se localiza en la corteza superior. De esta fracción, aproximadamente el 80% se concentra en la corteza superior frágil (equivalente al 75% de la sismicidad total). En conjunto, la sismicidad de los bloques más calientes y blandos presenta una profundidad media menor que la de los bloques fríos y resistentes (Fig. 1c). Por otra parte, el Índice de Densidad Sísmica es de 3 a 5 veces mayor en los bloques calientes y blandos que en los bloques fríos y rígidos.

Sin embargo, hay que destacar dos importantes resultados anómalos. Concretamente, el Bloque de Cartagena presenta un Índice de Densidad Sísmica muy bajo en relación con los otros bloques calientes y blandos. Este resultado puede ser explicado de dos maneras muy diferentes: 1) la muestra de terremotos empleada no era representativa o, 2) el gradiente geotérmico promedio de todo el Bloque de Cartagena es superior al estimado, o, dicho de otro modo, que el valor del flujo térmico empleado en el cálculo de la geoterma debe ser en realidad mayor. En este trabajo se

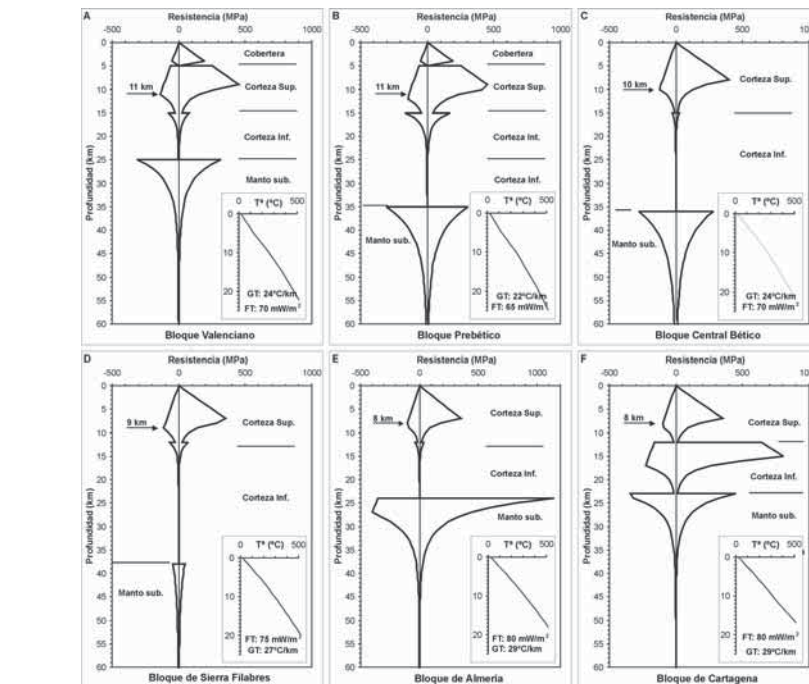


Fig. 2.- Perfiles reológicos y geotermas calculadas en cada bloque cortical. Se indica la profundidad máxima de la transición frágil-dúctil, el gradiente geotérmico en la corteza superior (GT) y el valor del flujo térmico considerado en el cálculo (FT). Los parámetros empleados se resumen en las tablas 1 y 2. A. Bloque Valenciano, B. Bloque Prebético, C. Bloque Central Bético, D. Bloque de Sierra Filabres, E. Bloque de Almería, F. Bloque de Cartagena.

Fig. 2.- Rheology profiles and geotherms calculated in each of the crustal blocks. The maximum depth of the fragile-ductile transition, upper crust geothermal gradient and the heat flux value considered in the calculations are shown. Parameters are shown in tables 1 and 2. A. Valenciano Block, B. Prebético Block, C. Central Bético Block, D. Sierra Filabres Block, E. Almería Block, F. Cartagena Block.

admite como correcta la explicación 2. La ocurrencia de sismicidad en el interior del Bloque de Cartagena es muy baja desde tiempos históricos y, por tanto, es más probable que la escasez de sismicidad sea debida a un mayor predominio de mecanismos de deformación dúctiles merced a un alto gradiente geotérmico, baja resistencia de la corteza superior y menor densidad de fracturación. Por otra parte, en el Bloque Central Bético se da el caso inverso, un alto Índice de Densidad Sísmica en relación con los otros bloques fríos y resistentes. Esta situación podría ser indicativa de que el flujo térmico considerado como representativo de este bloque es en realidad mayor o, que el Bloque Central Bético constituye una clase intermedia entre los «fríos y resistentes» y los «calientes y blandos».

Discusión: Zonación sismogénica del SE de España

A partir de los resultados obtenidos anteriormente se pueden definir en el SE de España cuatro zonas sismogénicas diferentes. Es decir, zonas donde la tasa de ocurrencia de sismicidad y la proporción entre sismos grandes y pequeños debe ser diferente en unas respecto de las otras.

Zona Sierra Filabres–Almería: El gradiente geotérmico y resistencia de la corteza superior en estos bloques los clasifica como «calientes y blandos» en relación con los otros bloques. La sismicidad contenida en ambos bloques presenta, así mismo, valores muy similares en cuanto a profundidad media e Índice de Densidad Sísmica.

Zona Prebética–Valenciana: Los bloques que forman esta zona se pueden clasificar como relativamente «fríos y resistentes» en función de sus gradientes geotérmicos y resistencia de la corteza superior. Las características de la sismicidad contenida en la corteza superior son, así mismo, muy similares en ambos bloques.

Zona de Cartagena y Zona Central Bética: Estas zonas están constituidas por los bloques de Cartagena y Central Bético, respectivamente. En ambos bloques se han encontrado relaciones anómalas entre las características de la sismicidad y las propiedades resistentes y térmicas de la corteza superior.

Para comprobar la hipótesis de que cada una de estas zonas presenta características sismogénicas diferentes se ha calculado en cada una de ellas los parámetros a y b de Gutenberg-Richter (Fig. 1d). Efectivamente, se comprueba que la Zona Sierra Filabres–

Capas	Litotipo	Parámetros Reológicos			Parámetros Térmicos		
		A (MPa ⁻ⁿ s ⁻¹)	E (kJ/mol)	n	Densidad (kg/m ³)	K (W/mk)	H (10 ⁻⁶ W/m ³)
Cobertera Sedimentaria	Caliza*	2,0 · 10 ⁴	213	1,7	2600	3,30	~ 0
	Rocksalt*	7,9 · 10 ⁴	66,5	4,5			
Corteza Superior	Granito*	2,0 · 10 ⁶	186,5	3,3	2700	2,50	2,7
Corteza Intermedia	Cuarzodiorita ⁺	1,30 · 10 ³	219,0	2,4	2800		
Corteza Inferior	Granulita félsica [^]	8,0 · 10 ³	243,0	3,1	2900	2,10	0,8
Manto Subcrustal	Bloque Prebético Peridotita ⁺	2,5 · 10 ⁴	532,0	3,5	3200	3,40	~ 0
	Bloque Valenciano Peridotita Wet ⁺	2,0 · 10 ³	471,0	4,0			

Tabla I.- Parámetros reológicos y térmicos empleados en la construcción de los perfiles reológicos y geotermas de los bloques del Dominio Cortical Ibérico. A, parámetro de Dorn; E, energía de activación; n, exponente de esfuerzo; K, conductividad térmica; H, producción calorífica. Datos de resistencia dúctil tomados de (*) Carter y Tsen (1987), (^) Wilks y Carter (1990) y (+) Ranalli (1997). Para la construcción de la geoterma se han empleado valores de flujo térmico de 65 y 70 m/Wm² en el Bloque Prebético y Valenciano, respectivamente (Fernández et al., 1998). Para la construcción del perfil reológico se ha considerado una tasa de deformación de 10⁻¹⁶ s⁻¹ (Negredo et al, 2002).

Table I.- Rheology and thermal parameters considered in the calculation of the geotherm and rheology profile of the blocks comprise in the Iberian Crustal Domain. A, Dorn parameter; E, activation energy; n, stress exponent; K, thermal conductivity; H, calorific production. Ductile strength parameters are from (*) Carter and Tsen (1987), (^) Wilks and Carter (1990) and (+) Ranalli (1997). Surface heat flow values used to calculate the geotherm are 65 and 70 m/Wm² for the Prebético and Valenciano blocks, respectively (Fernández et al., 1998). Strain rate for the rheological profile is 10⁻¹⁶ s⁻¹ (Negredo et al, 2002).

Capas	Litotipo	Parámetros Reológicos			Parámetros Térmicos		
		A (MPa ⁻ⁿ s ⁻¹)	E (kJ/mol)	n	Densidad (kg/m ³)	K (W/mk)	H (10 ⁻⁶ W/m ³)
Corteza Superior	Cuarcita ⁺	6,70 · 10 ⁻⁶	156	2,4	2700	2,50	1,3
Corteza Inferior	Resto de Bloques Cuarzodiorita Wet ⁺	3,16 · 10 ⁻²	212	2,4	2800	2,50	2,30
	Bloque Cartagena Granulita máfica [^]	1,4 · 10 ⁴	445,0	4,2	2900	2,10	0,4
Manto Subcrustal	Peridotita ⁺	2,5 · 10 ⁴	532	3,5	3200	3,40	~ 0

Tabla II.- Parámetros reológicos y térmicos empleados en la construcción de los perfiles reológicos y geotermas de los bloques del Dominio Cortical Bético. Explicación de los parámetros en la Tabla I. Para la construcción de la geoterma se han empleado valores de flujo térmico de 70, 75 y 80 m/Wm² en los bloques Central Bético, Sierra Filabres, Almería y Cartagena, respectivamente (Fernández et al., 1998). Para la construcción del perfil reológico se ha considerado una tasa de deformación de 10⁻¹⁵ s⁻¹ (Negredo et al, 2002).

Table II.- Rheology and thermal parameters considered in the calculation of the geotherm and rheology profile of the blocks comprise in the Betic Crustal Domain. Surface heat flow values used to calculate the geotherm are 70, 75 and 80 m/Wm² for the Central Bético, Sierra Filabres, Almería y Cartagena, respectively (Fernández et al., 1998). Strain rate for the rheological profile is 10⁻¹⁵ s⁻¹ (Negredo et al, 2002).

Almería presenta valores de *a* y *b* mayores que los de la Zona Prebética-Valenciana. Por otra parte, los valores de *a* y *b* de las Zonas de Cartagena y Central Bético son intermedios entre los de las zonas anteriores, lo cual es coherente con el carácter anómalo que presentan estos bloques.

Conclusiones

La metodología propuesta en este trabajo permite establecer de modo objetivo y fundamentado las zonas sismogénicas a emplear en un posterior cálculo de peligrosidad sísmica. Conviene señalar, sin embar-

go, la necesidad de comprobar la viabilidad de esta metodología en ambientes geodinámicos diferentes a los de las Cordilleras Béticas Orientales y en regiones con menor disponibilidad de datos geofísicos y sísmicos.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido parcialmente financiado por el proyecto MICEP (GR/AMB/0071/2004) de la DGUI-CAM. Las observaciones efectuadas por el revisor han redundado en una mejora del trabajo.

Referencias

- Aki, K. (1966). *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 44, 23-88.
- Banda, E. y Ansonge, J. (1980). *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 63, 515-532.
- Banda, E., Gallart, J., García-Dueñas, V., Dañoibeitia, J.J. y Makris, J. (1993). *Tectonophysics*, 221, 53-66.
- Carbonell, R., Torné, M., García-Dueñas, V., Moya, R. y Banda, E. (1997). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8, 503-512.
- Carter, N.J. y Tsen, M.C. (1987). *Tectonophysics*, 136, 27-63.
- Chen, W.-P. (1988). *Seismological Research Letters*, 59, 263-272.
- Fernández, M., Marzán, I., Correia, A. y Ramalho, E. (1998). *Tectonophysics*, 291, 29-53.
- Gallart, J., Rojas, H., Díaz, J. y Dañoibeitia, J.J. (1990). *Journal of Geodynamics*, 12, 233-252.
- García-Dueñas, Banda, E., Torné, M., Córdoba, D. y ESCI-Béticas Working Group. (1994). *Tectonophysics*, 232, 77-89.
- García-Mayordomo, J. (2005). *Caracterización y Análisis de la Peligrosidad Sísmica en el Sureste de España*. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 373 p.
- Giner, J.J., Molina, S. y Jauregui, P. (2002). *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92, 543-554.
- Meissner, R. y Wever, T. (1986). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, A 317, 45-61.
- Negredo, A.M., Bird, P., Sanz de Galdeano, C. y Buforn, E. (2002). *Journal of Geophysical Research*, 107(B11).
- Ranalli, G. (1995). *Rheology of the Earth*. Chapman and Hall, 413 p.
- Ranalli, G. (1997). En: *Orogeny Through Time* (Burg, J.P. y M. Ford, Eds.). Geological Society Special Publication, 121, 19-37.
- Reiter, L. (1990). *Earthquake Hazard Analysis*. Columbia University Press, 253 p.
- Roy, R.F., Blackwell, D.D. y Birch, F. (1968). *Earth and Planetary Science Letters*, 5, 1-12.
- Sibson, R.H. (1983). *Journal of the Geological Society*, 140, 741-767.
- Sibson, R.H. (1984). *Journal of Geophysical Research*, 89(B7), 5791-5799.
- Vidal, N., Gallart, J., y Dañoibeitia, J.J. (1997). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8, 417-429.
- Wesnousky, S.G. (1986). *Journal of Geophysical Research*, 91(B12), 12587-12631.
- Wilks, K.R. y Carter, N.L. (1990). *Tectonophysics*, 182, 57-77.
- Zeyen, H.J., Banda, E., Gallart, J. y Ansonge, J. (1985). *Earth and Planetary Science Letters*, 75, 393-402.