

Geometría fractal de la Zona de Falla de Lorca-Alhama (Murcia, SE España)

Fractal geometry of the Lorca-Alhama Fault Zone (Murcia, SE Spain)

P.G. Silva

Dpto. Geología, Universidad Salamanca. E.U. Politécnica de Avila, 05003-Avila. E-mail: pgsilva@gugu.usal.es

ABSTRACT

Fractal theory is applied in a quantitative analysis of the Lorca-Alhama Fault Zone geometry. Direct estimates of fractal dimension [D] of portions of the Lorca-Alhama Fault, has been based on the different geometric segments proposed by Silva et al (1992). Individual fractal dimensions are obtained from a set of measured fault lengths, analogous to the lengths of coastlines discussed by Mandelbrot (1982). Based on fault traces mapped at a scale of 1:25.000, [D] is 1,25 for the entire fault zone. But in the segmented analysis, reaches characterized by complicated fault geometry, are associated with larger values of [D]. In contrast, reaches with lowest values of [D], are related to areas of moderate/low seismic activity. In particular, sectors with [D] lowest than 1.15 are totally aseismic, and seem to be necessary to exceed [D] values of 1.4 to nucleate major earthquakes.

Key words: Fractal geometry, Fault segmentation, Seismicity, Lorca-Alhama Fault, SE Spain.

Geogaceta, 20 (6) (1996), 1385-1388
ISSN:0213683X

Introducción

Análisis cuantitativos de la geometría de trazas de las fallas en el SW de EEUU indican la existencia de patrones extremadamente complejos que se repiten independientemente de la escala de observación utilizada (King, 1983; Aviles y Scholz, 1987; Okubo y Aki, 1987; Zahng *et al.*, 1992). La geometría fractal desarrollada por Mandelbrot (1982) permite el estudio numérico de la complejidad geométrica de estos accidentes tectónicos, comparando de una manera "cuantitativa" el distinto grado de complejidad exhibido entre los distintos sectores y/o segmentos de una misma falla, mediante el cálculo de su "dimensión fractal". Para la traza de una falla bidimensional, la dimensión fractal [D] se encuentra entre los valores 1 y 2. D=1 indica que la falla es una línea completamente recta, mientras que D=2 indica que la falla es una curva muy compleja que rellena por completo la totalidad de la superficie examinada (Okubo y Aki, 1987). De esta manera se puede considerar al valor de D como una medida cuantitativa del grado de complejidad geométrica, irregularidad ó fragmentación, de diferentes zonas de falla o segmentos de estas.

Los resultados de los autores citados muestran que una misma zona de falla presenta sectores con dimensiones fracta-

les altas y bajas, que se disponen de forma alternante. Es decir presentan sectores geoméricamente simples (segmentos) separados de otros de geometría más compleja (límites de segmento). Por otra parte, el grado de complejidad geométrica muestra una relación directa, con procesos tales como nucleación de terremotos, y propagación de rupturas cosísmicas (Aki, 1989). Estos datos parecen indicar que es, efectivamente, la geometría bidimensional de una falla la que ejerce un control específico en la nucleación de terremotos y propagación de rupturas cosísmicas, y que por tanto, el análisis geométrico "cuantitativo" de fallas pueden ser un método de segmentación eficaz para zonas en de sismicidad moderada en la que los registros paleosísmicos son más bien escasos. En este estudio se ha seleccionado una falla de desgarre activa, es decir con actividad sísmica actual (Mezcua *et al.*, 1984), y evidentes rasgos de la ocurrencia de rupturas superficiales durante los dos últimos millones de años, como lo es la Zona de Falla de Lorca-Alhama (Baena *et al.*, 1994; Silva *et al.*, en prensa). El método utilizado, para el cálculo de la dimensión fractal ha sido el de "cobertura de círculos" (Mandelbrot, 1982; Okubo y Aki, 1987). Los cálculos se han realizado, en base a la cartografía de la Zona de Falla a escala 1:25.000, sec-

torizando el análisis de acuerdo con los diferentes segmentos geoméricos definidos por Silva *et al.* (1992) para esta zona de falla.

Teoría fractal y análisis geométrico de fallas.

Siguiendo la metodología usada por el propio Mandelbrot (1982), en orden de aproximar cualquier objeto lineal (línea de costa, traza de una falla) a una serie de segmentos rectos de longitud dada (r), y calcular su longitud total (Lr) se requiere conocer dos constantes [A] y [D], ya que la para cubrir la longitud total (Lr) de un objeto lineal a partir de una serie de segmentos de longitud (r) se requiere un número total de A r-D de tales segmentos, de manera que:

$$L(r) = Ar^{1-D} \quad [1]$$

Implícitamente, a medida que se reduce la longitud de los segmentos de medida utilizados, la longitud total del objeto lineal (L(r)) tenderá a incrementar infinitamente. Representando gráficamente los distintos valores de (r) utilizados frente a las resultantes longitudes totales (L(r)) en papel logarítmico, se obtiene una relación empírica que se expresa mediante la siguiente función:

$$\log_{10} L(r) = a + b \log_{10} r \quad [2]$$

Comparando las ecuaciones [1] y [2]

se observa que $a = \log_{10} A$ y que $b = 1 - D$. De aquí se deduce que $L(r)$ incrementará más rápidamente a medida que los valores de D sean mayores, estando directamente relacionados con curvas cada vez más complejas. De esta forma Mandelbrot (1982) estimó que el valor de D que aparece en el exponente de esta función [3] podría ser considerado como una dimensión, denominándola Dimensión Fractal y cuyo valor sería $D = b + 1$.

Okubo y Aki (1977), desarrollan el método de "cobertura de círculos" en su análisis fractal de la Falla de San Andrés, según el cual se utilizan diferentes círculos de cobertura de un radio (r) dado, de manera que utilizando el mínimo número $N(r)$ de estos se cubra por completo la traza de la Zona de Desplazamiento Principal (ZDP) de la falla a analizar. De esta manera la longitud de la falla será función directa del radio (r) de los círculos de cobertura, y puede ser definida como el área total de los $N(r)$ círculos utilizados dividida por el diámetro ($2r$) individual de tales círculos [3]. Posteriormente normalizando la longitud por el factor $\pi/4$ se obtiene la longitud total resultante mediante la ecuación [4]:

$$L(r) = N(r)\pi r^2/2r \quad [3]$$

$$L(r) = 2r N(r) \quad [4]$$

Dos puntos fundamentales a la hora de realizar el análisis fractal de la traza de una falla son la elección de la escala de trabajo, y la selección de los radios mínimos y máximos de los círculos de cobertura a utilizar. En el caso que nos ocupa la escala de trabajo seleccionada ha sido la cartografía de la ZDP de la Falla de Lorca-Alhama a escala 1:25.000 (Silva, 1994).

La selección de los radios de los círculos de cobertura a utilizar en el análisis, ha de realizarse en función de características y/o procesos físicos determinados asociados a las fallas, como puede ser el espesor de sus zonas sismogénicas (Andrews, 1980). Siguiendo, las ideas propuestas por este autor, para este estudio se ha seleccionado un radio superior de 4,5km, de manera que el diámetro de sus círculos de cobertura coincida con la profundidad epicentral media (9km) de la sismicidad registrada instrumentalmente a lo largo de la Falla de Lorca-Alhama (I.G.N., 1992). Por otra parte el radio inferior ha venido impuesto por la propia escala de trabajo, siendo este de 0,175km, es decir círculos con diámetros de 350m (7mm a escala). En total se han seleccionado un total de diez círculos de cobertura con radios comprendidos entre estos valores.

Determinación de la Dimensión Fractal en la Zona de Falla de Lorca-Alhama.

La Figura 1 constituye una reducción esquematizada del mapa 1:25.000 de la Falla de Lorca-Alhama utilizado en este estudio. En el análisis, también se han tenido en cuenta todas aquellas trazas de falla que intersectan o convergen con la ZDP de la falla, ya sean estas fallas subsidiarias, transversales o heredadas. El cálculo de la dimensión fractal ha sido realizado, tanto para la totalidad de la falla, como para los distintos sectores, que en función de su patrón estructural, complejidad geométrica y orientación, pueden considerarse como segmentos geométricos individuales ó límites de estos. En un principio se han considerado los cuatro segmentos principales en que se divide esta falla definidos por Silva *et al.* (1992): Pto.Lumbreras (AB), Lorca-Alhama (DE), Alhama-Alcantarilla (G) y Murcia-Orihuela (H), sectorizando los dos primeros e incluyendo los límites de segmento constituidos por Los Contractional Duplex de Lorca (C) y de Alhama

(F) (Figura 1).

El análisis se ha llevado a cabo mediante el mencionado método de cobertura de círculos de Okubo y Aki (1987). Los datos resultantes se muestran numéricamente en la Tabla 1, y gráficamente (ejes logarítmicos) en la Figura 2. La dimensión fractal [D] para la totalidad de la ZDP de la Falla de Lorca-Alhama es de 1.25 ± 0.02 (desv. std.) presentando un coeficiente de correlación de 0.99, que afirma la representatividad de la estimación. Examinando los distintos sectores, se observa que la dimensión fractal, y por tanto la complejidad geométrica de la falla disminuye ostensiblemente de SE a NW, desde los 1.43 ± 0.17 del sector Goñar-Huercal (A) a los 1.11 ± 0.07 del de Murcia-Orihuela (H).

Sin embargo, una segunda lectura de estos datos nos revela la existencia de dos sectores anómalamente complejos en el sector central de su ZDP, los constituidos por el Contractional Duplex de Lorca (C) que muestra una dimensión fractal de 1.37 ± 0.19 y el sector de Totana-Alhama (E) en el que el valor se eleva a 1.38 ± 0.10 . Ambos se sitúan en la Zona

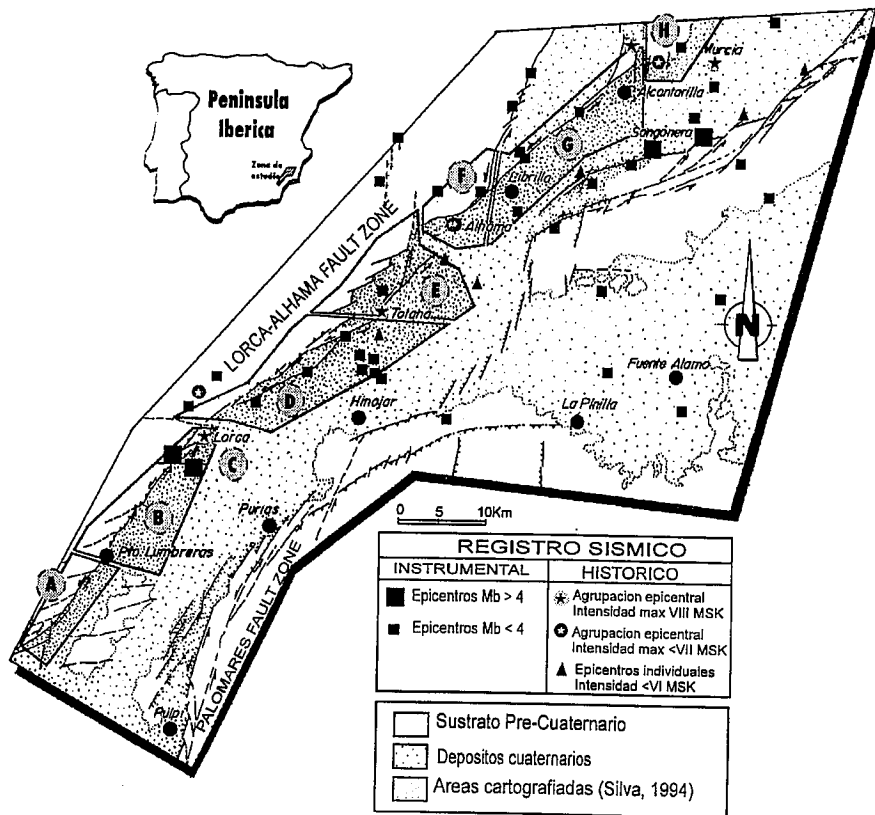


Fig. 1.- Mapa esquemático mostrando los distintos sectores considerados (A, B, C, etc..) en el análisis geométrico fractal de la Zona de Falla de Lorca-Alhama en relación con el registro sísmico de la zona. (El sector de Nurcia-Orihuela [H] no esta completamente representado en el mapa)

Fig. 1.- Skecht-map showing the different subsets of the Lorca-Alhama Fault Zone (A,B, C, etc...) considered in the fractal analysis in relation with the seismic record of the region. (The Murcia-Orihuela [H] subset is not entirely showed).

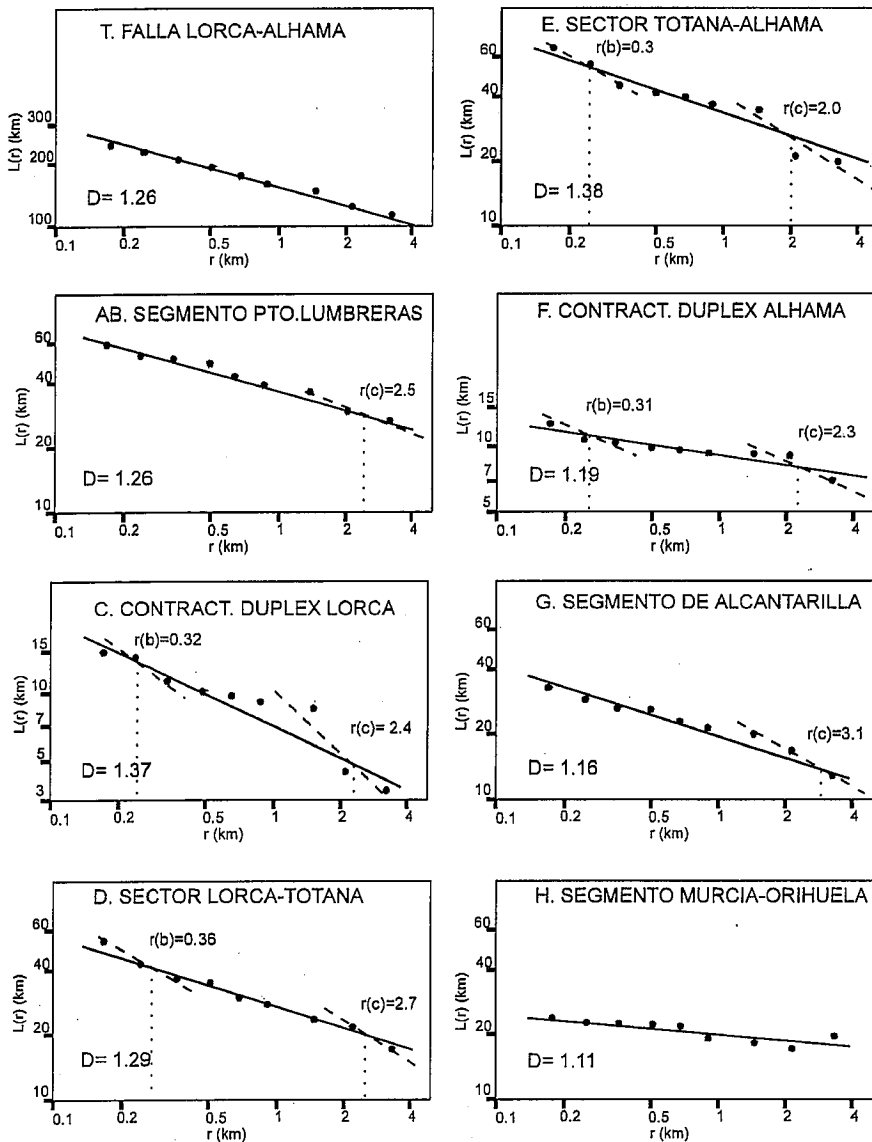


Fig. 2.- Gráficos (log-log) de Longitudes estimadas ($L(r)$) y radios de círculos de cobertura para el total de la Zona de Falla de Lorca-Alhama y diferentes sectores considerados analizados a 1:25.000. Las líneas continuas representan las rectas de regresión de mínimos cuadrados que mejor se ajustan a los datos. Las líneas de trazos constituyen las rectas de regresión ligadas a las rupturas fractales observadas, y sus intersecciones con la recta de regresión principal definen los radios críticos superiores [rc] e inferiores [rb].

Fig. 2.- Graphics (log-log) of estimated fault lengths ($L(r)$) versus measuring radii for the Lorca-Alhama Fault Zone and considered subsets at 1:25.000. Solid lines are best least squared fits to data. Dashed lines represent regression lines linked to fractal cutoffs, their intersections with the main regression line define the upper [rc] and lower [rb] cutoff radii.

central de la Falla, definiendo los sectores iniciales y finales donde su ZDP se ramifica y flexiona, adquiriendo una orientación N65E, y abandonando la más característica de N45E que poseen los restantes segmentos. La primera de estas zonas, el Contractual Duplex de Lorca (C), puede considerarse como un auténtico límite de segmento ya que este separa el segmento asísmico de Pto.Lumbreras (AB) del resto de los segmentos sísmicos de la falla. Además es en este sector donde tiene lugar la nucleación de los terremotos más importantes de esta zona de

falla (Silva, 1994), presentando M_{max} de 4,3 e I_{max} de VIII M.S.K. (Mezcua *et al.*, 1984; I.G.N., 1992). La segunda zona de dimensión fractal elevada, es el mencionado sector de Totana-Alhama, este constituye la zona donde la ZDP de la falla posee su máxima anchura, alcanzando hasta los 6km (Silva, 1994), y donde se concentra más del 60% de la actividad sísmica del segmento que la contiene presentando M_{max} de 3,3 e I_{max} de VII M.S.K. (I.G.N., 1992).

El sector de mayor complejidad geométrica, es el de Goñar-Huerca (A)

mencionado anteriormente. Este puede considerarse como el auténtico sector ó zona terminal SE de esta Zona de Falla. Su mayor complejidad viene determinada por el desarrollo de un patrón estructural en "cola de caballo" motivado por la convergencia de fallas subsidiarias más antiguas (Neógenas) de dirección N70-90E con la ZDP de la falla (N40E), constituyendo lo que en la terminología estructural aplicada a fallas de desgarrar se denomina un "Terminal Splay" extensional (Silva, 1994). Como en el resto de sectores de complejidad elevada en este se registran únicos indicios de actividad sísmica actual del denominado segmento de Pto.Lumbreras (AB), siendo las M_{max} registradas de 4.0, es decir importantes en relación con las magnitudes máximas registradas instrumentalmente en el resto de la zona de falla. Únicamente existe un sector, de todos los considerados, que presenta una dimensión aproximada a la calculada para la totalidad de la Falla. Este es de Lorca-Totana (D) que presenta un valor ligeramente superior de 1.29 ± 0.03 , siendo estructuralmente similar al sector de Totana-Alhama (D).

El resto de los sectores analizados presentan dimensiones fractales muy bajas, comprendidas entre los 1.19 ± 0.05 del Contractual Duplex de Alhama (F) y los 1.11 ± 0.07 del segmento de Murcia-Orihuela (H). Excepto, el mencionado en primer lugar, todos los demás poseen ZDPs muy estrechas (<400m) y, aunque con patentes patrones braided y/o "en escalon", fundamentalmente rectilíneas. En los casos de los sectores de Pto.Lumbreras-Lorca (B) y Murcia-Orihuela (H), la discreta dimensión fractal registrada se correlaciona con el carácter asísmico de ambos sectores (Silva, 1994). En el caso del sector de Alhama-Alcantarilla (G), con dimensión fractal 1.16 ± 0.04 , presenta el menor grado de sismicidad de todos los sectores sísmicos de la zona de Falla, en el tan sólo se concentra el 16% de la sismicidad total y nunca se han superado M_{max} de 2,9 e I_{max} de III M.S.K. Sólo en el Contractual Duplex de Alhama (F), coincidiendo con su claro carácter de límite de segmento, se registró un terremoto de Intensidad V M.S.K. en 1927 (I.G.N., 1992).

Conclusiones

Es necesario comentar la extraordinaria correlación directa existente entre dimensión fractal y niveles de sismicidad para los distintos sectores analizados. El número de terremotos y magnitud asociada es mayor a medida que aumenta la Di-

TOTAL	A	B	AB	C	D	E	DE	F	G	H
r = 4,5km N = 12 L _(r) 108km	1	2	3	1	2	2	4	1	3	2
r = 3,25km N = 18 L _(r) 117km	1	3	4	1	3	3	6	1	3	3
r = 2,10km N = 30 L _(r) 126km	2	5	7	1	5	5	10	2	5	4
r = 1,45km N = 52 L _(r) 150,8km	5	8	13	3	8	12	20	3	7	6
r = 0,90km N = 89 L _(r) 160,2km	9	13	22	5	15	20	36	5	12	10
r = 0,675km N = 129 L _(r) 174,5km	12	19	31	7	22	29	51	7	17	16
r = 0,50km N = 192 L _(r) 192km	21	27	48	10	35	41	76	10	26	22
r = 0,35km N = 299 L _(r) 209km	32	41	73	16	52	71	123	15	38	32
r = 0,25km N = 454 L _(r) 227km	46	60	106	25	80	111	191	22	59	46
r = 0,175km N = 692 L _(r) 242,2km	67	89	156	37	128	170	298	34	89	67
[D] = 1.25	1.43	1.14	1.26	1.37	1.29	1.38	1.33	1.19	1.16	1.11

Tabla 1.- Datos numéricos resultantes del análisis fractal mediante el método de "círculos de Cobertura". [r]= Radios de círculos de cobertura; [N]= Numero mínimo de círculos empleados; [L(r)]= Longitud de falla estimada; [D]= Dimensión Fractal resultante.

Table 1.- Numerical data from the fractal analysis of the Lorca-Alhama Fault Zone using the "Circle Coverage" method. [r]= Radii of covering circles; [N]= Minimum number of circles used; [L(r)]= Estimated fault length; [D]= Resultant Fractal dimension.

mensión fractal, y disminuye, siendo asísmicos, cuando la dimensión fractal es inferior a 1.15. En este sentido, parecen evidentes dos conclusiones: A) Que solo a partir de dimensiones fractales cercanas a 1.4 la falla es capaz de generar terremotos de magnitud superior a 4 e intensidades cercanas a VIII M.S.K.; y B) Que el único modelo de segmentación hasta ahora propuesto, basado en datos estructurales y geomorfológicos (Silva *et al.*, 1992), necesita ser revisado en virtud de los resultados obtenidos, ya que los denominados segmentos de Pto.Lumbreras y de Lorca-Alhama, presentan dos sectores de Dimensión fractal bien distinta, en el primer caso opuesta, y con comportamientos sísmicos claramente diferenciables. El resultado sería el establecimiento de segmentos de una longitud lineal media de unos 18-20km (B, D, E, F y G) y límites de segmento intermedios de longi-

tudes lineales en torno a los 6.5-8.0km, los cuales incluirían el sector terminal SE de la Zona de Falla.

Por último, es necesario apuntar la existencia de lo que se denominan "rupturas fractales" (Figura 2), es decir que la geometría de la falla no cumple las propiedades fractales de auto-afinidad e invarianza escalar, pero en sentido opuesto al que definen Okubo y Aki (1987) en su estudio de la Falla de San Andrés. Muy por el contrario de lo señalado por estos autores, sobrepasados estos radios críticos de ruptura superiores (rc= 2-3km) e inferiores (rb= 1.2-1.4km), la falla no se convierte en un objeto lineal no fractal, sino que reafirma su carácter fractal aumentando los valores de [D]. Aunque este proceso necesita un análisis de detalle, en una primera aproximación se puede decir que ambas rupturas están intrínsecamente relacionadas con variables físicas de la

propia ZDP de la falla. La ruptura determinada para radios superiores (rc) parece estar relacionada con la longitud de los segmentos y el espesor de su zona sismogénica, y la de radios inferiores (rb) con la de la propia anchura de la zona de falla, muy especialmente en aquellos sectores donde se encuentra ramificada. En una primera lectura se podría decir que la falla va a mantener su carácter fractal hasta que los radios de los círculos de cobertura alcancen un valor aproximadamente igual a la mitad de la longitud media de sus segmentos, o hasta que en escalas inferiores alcancen radios milimétricos aproximadamente similares al tamaño de grano de las rocas de falla allí generadas.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por los proyectos de investigación de la DGI-CYT PB92-0282 (Univ.Salamanca) y PB92-0023 (MNCCN, CSIC), y es una aportación a la INQUA Neotectonics Commission.

Referencias

Aki, K. (1981).- En: *Earthquake Prediction. Maurice Ewing Ser.*, 4. AGU, Washington D.C., 566-574.
 Andrews, D.J. (1980).- *J. Geophys. Res.*, 85, 3867-3877.
 Aviles, C.A. y Scholz, C.H. (1987).- *J. Geophys. Res.*, 92, 331-334.
 Baena *et al.*, (1994).- *Mapa de Actividad de Fallas de la Región de Murcia*. ITGE, 97 págs.
 I.G.N. (1992).- *Catálogo Sísmico Provincia de Murcia*. 57pp.
 King, G.C. (1983).- *Pure Appl. Geophys.*, 121, 761-815.
 Mandelbrot, B.B. (1982).- *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, 460pp.
 Mezcua, J. *et al.*, (1984).- *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 74, 167-179.
 Okubo, P.G. y Aki, K. (1987).- *J. Geophys. Res.*, 92, 345-355.
 Silva, P.G. (1994).- *Evolución Geodinámica de la Depresión del Guadalentín*. Tesis Doctoral UCM.
 Silva, P.G. *et al.*, (1992).- *Geogaceta*, 12, 7-11.
 Silva, P.G. *et al.*, (en prensa).- *J. Geodynamics.*, (1996).
 Tchalenko, J.S. (1970).- *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 1625-1640.
 Zhang, P. *et al.*, (1991).- *J. Struct. Geol.*, 13, 165-176.