

Geometría y Cinemática de Fallas recientes en el margen septentrional del mar de Alborán (sector de Maro, provincia de Málaga)

Geometry and Kinematics of Recent Normal Faults in the Northern Margin of the Alboran Sea (Maro Region, Málaga)

J.I. Soto y F.J. Manzano

Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (C.S.I.C.-Universidad de Granada) and Departamento de Geodinámica. Av. Fuentenueva s/n. 18071 Granada

ABSTRACT

The more recent structures in the northern continental margin of the Alboran Sea are NW-SE high-angle normal faults, oblique to the present coastal line and also to the actual crustal thinning pattern. The geometry and kinematics, with particular emphasis on the fault linkage patterns, of two of these recent faults with a preserved fault-scarp, the Las Alberquillas (av. 136/69° SW) and the Maro (av. 149/58° NE) faults, have been studied. The Maro fault is formed by several, small, and non-cylindrical fault segments (< 500 m length) frequently displaced by transfer faults, whereas the Las Alberquillas fault is formed by two long and planar fault segments (total length ≈ 3800 m), linked by a narrow en-echelon step, thus suggesting a major displacement in this master fault (estimated total displacement of the fault = 38 m). The maximum displacement in the Las Alberquillas fault occurs near its SE tip line, therefore suggesting the overlapping interference with a close and related synthetic normal fault in relay towards the SE in the Alboran Sea. Kinematic data on fault surfaces indicate a normal oblique sense of movement of these faults (rake of the main striae > 60°), being dextral and sinistral in the Las Alberquillas and the Maro faults, respectively. Other, secondary striae, with a right- or left-lateral sense of displacement occurs also locally near major corrugations in these faults. Average fault plane solution in both faults results in a NNE-SSW subvertical compression (*P* axis = 66/033° and 77/232°) and subhorizontal extension (*T* axis = 23/231° and 13/060°). Last fault slip occurred probably during the lower Pleistocene (≈ 800 ka), on the basis of the geometrical relationships with alluvial-fan deposits and radiometric data.

Key Words: Normal faults, Alboran Sea, Recent tectonics, Continental margins.

Geogaceta, 31 (2002), 139-142
ISSN:0213683X

Introducción

Las cadenas montañosas más meridionales de la Cordillera Bética han experimentado un levantamiento generalizado que está relativamente bien documentado desde el Plioceno inferior, durante el cual se ha configurado la actual línea de costas del Mar de Alborán (Comas *et al.*, 1999). Este levantamiento ha sucedido simultáneamente con una subsidencia en el mar, en donde se ha reconocido un pulso importante desde el Plioceno terminal (0,5 m/ka) (Watts *et al.*, 1993; Rodríguez-Fernández *et al.*, 1999). Las distintas campañas de topografía realizadas en la región atestiguan que este proceso de levantamiento es aún activo con unas tasas máximas de 1.5 mm/a (Giménez *et al.*, 2000). Este episodio de levantamiento reciente de los márgenes y subsidencia de la cuenca se produce en un contexto de renovada convergencia norte-sur (N20°-45°W) entre las placas africana y

euroasiática, tal y como confirman los movimientos actuales de placas (DeMets *et al.*, 1990).

Existen diversas observaciones geológicas y geofísicas que documentan este proceso en el margen del Mar de Alborán próximo a Málaga y acotan el intervalo de tiempo en el que ha sido activo. Entre todos estos datos cabe destacar los de tipo estratigráfico y paleontológico (e.g. Zazo y Goy, 1989), observaciones geomorfológicas (Lhenaff, 1981), así como estudios del margen sumergido mediante perfiles sísmicos de alta resolución (Alonso y Maldonado, 1992). Además, en las faldas meridionales de algunas de las elevaciones montañosas de la región de Málaga existen diversas dataciones absolutas en sedimentos recientes, espeleotemas (e.g. cuevas de Nerja; Henning *et al.*, 1983; Durán *et al.*, 1993) y terrazas cuaternarias con travertinos (Durán *et al.*, 1988) que junto con la elevación y posición estructural de

los sedimentos atestiguan el levantamiento topográfico reciente (< 25-27 ka).

No obstante, existen pocos datos sobre las estructuras ligadas a este episodio. Fallas normales de alto ángulo (N120°-140°E) y pliegues abiertos de dirección E-W son algunas de las estructuras recientes en el sector central del margen emergido de Alborán (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1991). Estas fallas normales, con una componente dextra de salto en dirección, se prolongan bajo el Mar de Alborán, afectan a los materiales de su basamento y desplazan los depocentros de la cuenca (Fig. 1). Algunas de estas fallas son aún activas y parecen controlar la sismicidad superficial (< 10 km) del margen (e.g. Stich *et al.*, 2001). En este trabajo describiremos la geometría y cinemática de las fallas recientes del margen emergido del Mar de Alborán, en concreto las situadas al E de Maro (Málaga) y discutiremos la edad de su funcionamiento.

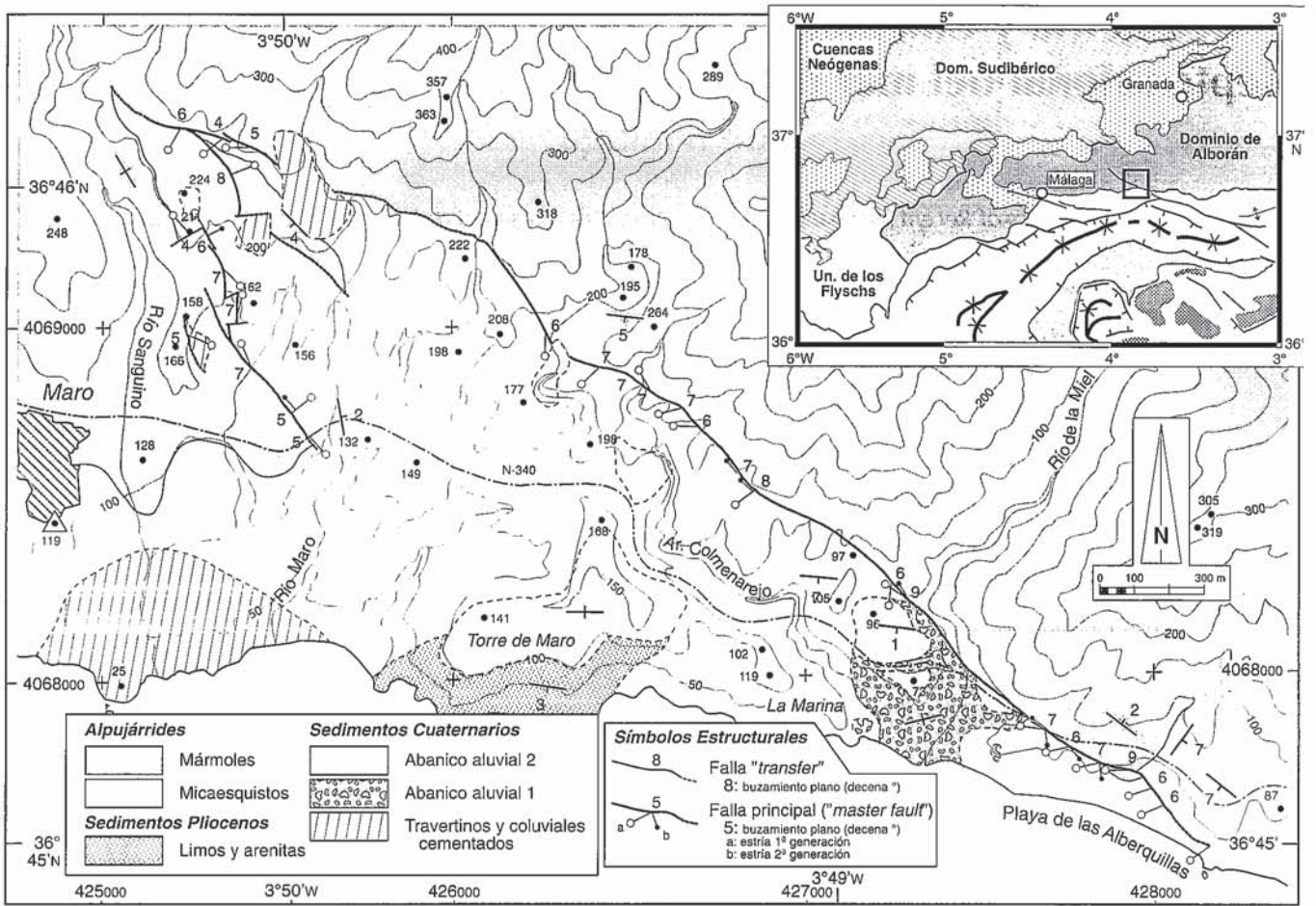


Fig. 1.- Mapa estructural de las fallas de Las Alberquillas y de Maro al E de esta localidad (provincia de Málaga). Cada medida estructural representa la media de entre 3 y 20 medidas. El buzamiento del plano de falla se muestra en el bloque de muro de la falla, en decena de grados. Los círculos en las estrías apuntan en el sentido de movimiento del bloque de techo. El trazado probable de las fallas se indica mediante una línea discontinua. Bajo el símbolo de "Abanico aluvial 2" también se incluyen depósitos fluviales actuales. Equidistancia del mapa topográfico: 50 m. El esquema superior derecho muestra la localización del área estudiada (recuadro con línea gruesa) en el margen septentrional del Mar de Alborán (tomado de Comas *et al.*, 1999). En este mapa la línea gruesa con cruces corresponde a la traza de un depocentro con sedimentos del Mioceno inferior y las rocas volcánicas aflorantes y subaflorantes se indican con una trama de red cruzada.

Fig. 1.- Structural map of the Las Alberquillas and the Maro faults at the E of the Maro village and the Cueva de Nerja (Málaga province). Each symbol is a mean of between 3 and 20 outcrop measurements. Fault dip is shown in tens of degrees in the footwall of the fault. Circles in the slickensides point toward the sense of slip of the hanging wall; white and black circles indicate first and second generation of striae, respectively. Probable fault trace is shown with a broken line. Stipple pattern represents a second generation of alluvial fan and also fluvial sediments. Topography contours are at 50 m interval. Upper right inset shows the location of the studied area (bold box) in the northern margin of the Alborán Sea Basin (taken from Comas *et al.*, 1999). In this map outcropping and sub-outcropping volcanic rocks are shown by dense stipple and the bold line with crosses indicates a lower Miocene depocenter (the Málaga basin).

Geometría de las fallas

Hemos analizado la geometría de dos fallas principales que afloran al E de Maro, prestando especial atención a las variaciones laterales de orientación del plano de falla y de las estructuras con valor cinemático. Estas fallas suelen aflorar bien a lo largo de todo su trazado y poseen un escarpe de falla poco degradado, lo que atestigua su funcionamiento en tiempos relativamente recientes. Estas fallas, denominadas como fallas de Maro y Las Alberquillas, son fallas de alto ángulo (buzamiento > 45°) y coinciden con los contactos litológicos principales entre metapelitas y mármoles

de grado medio de la unidad alpujarride de la Almirara (Fig. 1).

La Falla de Las Alberquillas tiene una dirección aproximadamente constante N136°E, con buzamientos entre 50° y 70° generalmente al SW (promedio 136/69° SW; Fig. 2a). La falla de Las Alberquillas está formada en detalle por dos segmentos que se relevan y solapan lateralmente ("en echelon step"). El segmento más septentrional tiene una longitud cartográfica de 350 m y el otro, que llega hasta la playa del mismo nombre, es de 3450 m (distancias medidas según la dirección media de la falla). Esta falla tiene una geometría tridimensional no cilíndrica,

puesta de manifiesto por las siguientes observaciones: (1) lateralmente pasa a tener dominios estrechos (<100 m) con fuerte buzamiento al SW o al NE; y (2) el buzamiento de la falla tiende a disminuir hacia sus extremos SE y NW. Los cambios laterales de buzamiento de la falla definen corrugaciones estrechas, paralelas a la dirección de movimiento principal de la falla en ese sector. Los extremos de la falla de las Alberquillas pueden corresponder a terminaciones laterales de falla ("fault tip line") ya que hacia ellas disminuyen el espesor de zona de falla asociado y la magnitud del buzamiento del plano de falla, aumentando la degra-

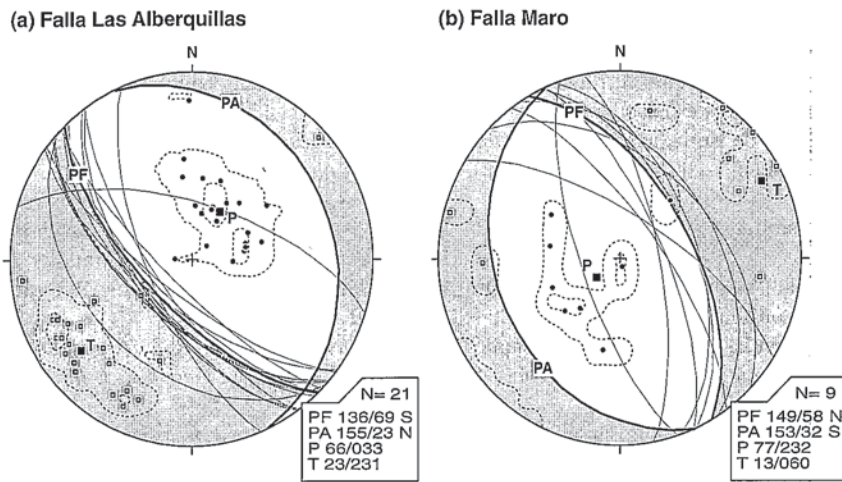


Fig. 2.- Mecanismos focales de las fallas de Las Alberquillas (a) y de Maro (b), mostrando la posición de los ejes P (círculos) y T (cuadrados) calculada mediante el método de los diedros rectos (Angelier y Mechler, 1977). Contornos de 2% y 10% de los ejes P y T en línea discontinua. PF: plano de falla; PA: plano nodal auxiliar. Cuadrante de compresión en gris. Proyección equiareal, hemisferio inferior.

Fig. 2.- Fault plane solution of the Las Alberquillas (a) and the Maro (b) faults, with the projection of the P (solid dots) and T (open squares) axes, calculated by the right dihedral method (Angelier y Mechler, 1977). P- and T-axis contour of 2% and 10% are shown with broken lines. PF: fault plane; PA: auxiliary nodal plane. Compressional quadrant in shading. Equiareal projection, lower hemisphere.

dación del escarpe de falla. Además, hacia las terminaciones laterales la falla se aleja de la dirección promedio N136°E. Todas estas observaciones demuestran que la falla de las Alberquillas es una falla cóncava hacia arriba y curva hacia las terminaciones laterales, donde se hace más tendida.

La Falla de Maro tiene una dirección media N149°E y buza hacia el NE (media 149/58° NE) y está constituida por un conjunto de segmentos pequeños (< 500 m) anastomosados, con frecuentes cambios laterales de orientación. Estos segmentos presentan geometrías en relevo y son desplazados por frecuentes fallas transversas de mayor buzamiento, fallas de tipo "transfer". La geometría tridimensional de los segmentos de esta falla es mucho más variada que para la falla de Las Alberquillas, existiendo segmentos convexos hacia arriba y aumentando de buzamiento hacia las terminaciones.

Cinemática y desplazamiento

Las superficies de falla son en casi todos los casos superficies pulidas (espejo de falla), recubiertos en parte por pátinas de limonita y calcita. Sobre estas superficies son abundantes a todas las escalas, estructuras menores indicativas de dirección y sentido de movimiento (cantos estriadores, escalones, planos Riedel, etc., e.g. Petit, 1987).

En ambas fallas se han encontrado dos juegos principales de estrías, uno más antiguo próximo a la línea de máxima pendiente (rakes > 60°) sobre el que se superpone un segundo juego de estrías próximo a la horizontal (rakes < 30°). Este segundo grupo de estrías aparece hacia las terminaciones laterales donde pueden reconocerse dos poblaciones de estrías subhorizontales. Las fallas de Las Alberquillas y de Maro resultan ser fallas normales con una componente lateral menor, sea dextra o siniestra, respectivamente. El sentido de movimiento deducido para el segundo juego de estrías en la falla de Las Alberquillas puede ser tanto dextro como siniestro. Los cambios de sentido de movimiento se encuentran a ambos lados de estructuras mayores en la falla, como corrugaciones y variaciones en el sentido de buzamiento. Este hecho, junto con que parecen estar circunscritas a la región próxima a la terminación lateral SE de esta falla, sugiere que una falla normal oblicua (dextra) previa es reactivada localmente como falla de salto en dirección. Esta interpretación contradice muchas de las sugerencias cinemáticas hechas por autores previos en la región sobre la magnitud de los desplazamientos horizontales en estas fallas (Sanz de Galdeano, 1993).

Los diagramas de diedros rectos de la Fig. 2 reconstruyen los mecanismos focales de estas fallas (método de

Angelier y Mechler, 1977), incluida la posición de los ejes principales de esfuerzo (ejes P o σ_1 y T o σ_3), para el juego principal de estrías. Los ejes P y T deducidos para cada medida cinemática, poseen menor dispersión en la falla de Las Alberquillas que en la de Maro (Fig. 2). Aún cuando el número de medidas estructurales sea inferior en esta última falla, el mayor agrupamiento de los ejes P y T en la falla de Las Alberquillas podría estar relacionado también con el mayor cilindricismo y menor complejidad estructural de sus segmentos frente a los que constituyen la falla de Maro.

Los ejes P y T promedio de la falla de las Alberquillas (Fig. 2a) muestran una compresión subvertical (66/033°) y extensión SW-NE (23/231°), congruente con el estado de esfuerzos deducido para la falla de Maro (Fig. 2b; P= 77/232° y T= 13/060°). Si la inclinación de los ejes de esfuerzo no fuese original en la falla de Las Alberquillas, esta falla habría experimentado una rotación horaria (al NW) de unos 20° tras su funcionamiento (pre-rotación 143/42° SW).

El salto se ha calculado para la falla de Las Alberquillas utilizando el desplazamiento del contacto entre mármoles y metapelitas en ambos bloques en el sector SE de la falla y la orientación media allí del juego principal de estrías (70°W; PF= 120/65° SW). Se obtiene un salto neto de 38 m, al que corresponden un salto en buzamiento de 36 m y un salto en dirección (dextro) de ≈14 m. Es importante destacar que este desplazamiento se ha medido próximo a la terminación SE de esta falla (≈ 300 m), lo que junto a otras observaciones (espesor zona de falla, degradación del escarpe, etc.) sugieren que el desplazamiento disminuiría hacia la otra terminación lateral (3500 m al NW). El que el desplazamiento sea máximo en las cercanías de la terminación lateral de esta falla sólo puede darse (Gupta y Scholz, 2000) si existe una falla sintética con la de Las Alberquillas y en relevo hacia el SE.

Aunque no hemos podido estimar el desplazamiento en la falla de Maro, su salto neto debe ser menor que el obtenido la falla de Las Alberquillas. Esta interpretación se basa en el menor tamaño de sus segmentos y en la relación directamente proporcional entre desplazamiento y dimensiones de una falla (Walsh y Watterson, 1988).

Edad de las fallas

La edad del funcionamiento de estas fallas sólo puede ser inferida para la de

Las Alberquillas, en función de sus relaciones con los depósitos de abanicos aluviales que se encuentran en el río de la Miel. Hemos distinguido dos abanicos aluviales depositados en un ambiente continental a marino somero y separados por una discordancia erosiva y suavemente angular. El abanico inferior se dispone subhorizontalmente (076/03° SE) y el superior buza poco hacia el sur (097/10° S) recubriendo parcialmente el plano de falla de Las Alberquillas (Fig. 1). En virtud del basculamiento que presenta la estratificación del abanico inferior respecto a la original que se observa en el abanico superior y sus relaciones con la falla, se deduce la existencia de una rotación mínima horaria de 7° de la falla de Las Alberquillas (mirando al NW según un eje de rotación 00/076°) tras su último funcionamiento. Esta rotación mínima es compatible con la inferida previamente (< 20° horaria) según la posición de los ejes de esfuerzo.

La edad de estos abanicos es controvertida, atribuyéndoseles una edad Pleistoceno por la asociación de "icnofacies" (Mayoral y Rodríguez-Vidal, 1988) o Plioceno (Guerra-Merchán y Serrano, 1993) por correlación con otras sucesiones estratigráficas más al W. Existen dos argumentos que apoyarían una edad Pleistoceno de estos abanicos: (1) el abanico de Nerja, sobre sedimentos conglomeráticos del Plioceno, tiene intercalaciones calizas de la base del Pleistoceno (120-142 ka); (Durán *et al.*, 1993); y (2) la interpretación de que sean de edad Pliocena conlleva el depósito y la erosión completa de todos los sedimentos del Pleistoceno en la desembocadura del río de la Miel (*cf.* Guerra-Merchán y Serrano, 1993), ya que en la Torre de Maro aparecen a cota 140 m. Esta interpretación nos parece poco compatible con los datos estructurales, porque ambos afloramientos no están separados por ninguna falla (Fig. 1) y por tanto la diferencia de cota entre ambos podría ser un rasgo original de los abanicos aluviales.

La falla de Las Alberquillas, por su relación geométrica con las dos formaciones conglomeráticas antes mencionadas, tendría un último pulso de movimiento antes del depósito del abanico aluvial superior (Fig. 1) y habría sido durante el Pleistoceno. El funcionamiento de esta

falla (y por ende de la falla conjugada de Maro) durante el Pleistoceno, podría explicar la importante etapa de rotura y crecimiento de nuevos espeleotemas observado en la cueva de Nerja, alrededor de 800 ka (Pleistoceno inferior; Durán *et al.*, 1993).

Conclusiones

(1) Fallas normales NW-SE de alto ángulo, oblicuas a la línea de costas, constituyen las estructuras más recientes en el margen septentrional del Mar de Alborán al E de Málaga.

(2) Las fallas de alto ángulo de Las Alberquillas (N136°/69° SW) y de Maro (N149°/58° NE) son fallas normales oblicuas (dextra y siniestra, respectivamente; rake de estrías principales > 60°), probablemente conjugadas a tenor de la compatibilidad entre sus mecanismos focales y la similar orientación de los esfuerzos (P= 033-050° y T= 230-240°). Ambas fallas presentan alrededor de corrugaciones estrías subhorizontales que indican su reactivación parcial y local como fallas de salto en dirección puro, tanto dextro como siniestro.

(3) El último funcionamiento de estas fallas tuvo lugar probablemente durante el Pleistoceno inferior, en virtud de la relación geométrica con sedimentos de abanicos aluviales y las edades radiométricas disponibles, lo que podría explicar la rotura y generación de espeleotemas en la cueva de Nerja (≈ 800 ka).

(4) La falla de Maro está constituida por segmentos pequeños (< 500 m), no cilíndricos y anastomosados, que son frecuentemente desplazados por fallas "transfer". La falla de Las Alberquillas, por el contrario, posee dos segmentos planos largos (longitud total ≈ 3800 m), lo que demuestra que el desplazamiento sería mayor en esta falla siendo la falla "master" del sistema.

(5) La zona de máximo desplazamiento en la falla de Las Alberquillas (salto neto ≈ 38 m) se encuentra próxima a su terminación SE, lo que demuestra el relevo de esta falla por otra sintética en el margen sumergido del Mar de Alborán.

Agradecimientos

Trabajo financiado con el proyecto de la CICYT MAR98-0981.

Referencias

- Alonso, B. y Maldonado, A. (1992): *Geo-Mar. Lett.*, 12, 137-143.
- Angelier, J. y Mechler, P. (1977): *Bull. Soc. Geol. France*, 19, 1309-1318.
- Comas, M.C., Platt J.P., Soto J.I. y Watts A.B. (1999): in *Proc. ODP Scientific Results* (R. Zahn, M.C. Comas y A. Klaus, eds.). Ocean Drilling Program, 161, 555-580.
- DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D.F. y Stein, S. (1990): *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.
- Durán, J.J., Grün, R. y Soria, J.M. (1988): *II Congr. Geol. Esp.*, 1, 383-386.
- Durán, J.J., Grün, R. y Ford, D.C. (1993): in *Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, ed.). Trab. sobre la Cueva de Nerja, 3, 233-248.
- Giménez, J., Surinach, E. y Goula, X. (2000): *Tectonophysics*, 317, 237-258.
- Guerra Merchán, A. y Serrano, F. (1993): in *Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, ed.). Trab. Cueva de Nerja, 3, 55-90.
- Gupta, A. y Scholz, H. (2000): *Jour. Struct. Geol.*, 22, 865-879.
- Henning, G.J., Grün, R. y Brunnacker, K. (1983): *Quat. Res.*, 20, 1-29.
- Lhenaff, R. (1981): *Tesis Univ. Lille*, 713 p.
- Mayoral, E. y Rodríguez-Vidal, J. (1988): *IV Jorn. Paleontol.*, 246-254.
- Petit, J.P. (1987): *Jour. Struct. Geol.*, 9 (5/6), 597-608.
- Rodríguez-Fernández, J., Comas, M.C., Soria, J., Martín-Pérez, J.A. y Soto, J.I. (1999): in *Proc. ODP Scientific Results* (Zahn, R., Comas, M.C. y Klaus, A., eds.). Ocean Drilling Program, 161, 69-76.
- Sanz de Galdeano, C. (1993): in *Geología de la Cueva de Nerja* (F. Carrasco, ed.). Trab. Cueva de Nerja, 3, 95-114.
- Sanz de Galdeano, C. y López Garrido, A.C. (1991): *Geodinámica Acta*, 5, 173-186.
- Stich, D., Alguacil, G. y Morales, J. (2001): *Geophys. Jour. Inter.*, 146, 801-812.
- Walsh, J. y Watterson, J. (1988): *Jour. Struct. Geol.*, 10 (3), 239-247.
- Watts, A.B., Platt, J.P. y Bulh, P. (1993): *Basin Research*, 5, 153-177.
- Zazo, C. y Goy, J.L. (1989): in *Late Quaternary Sea-Level Correlation and Applications* (Scott, D.B. *et al.*, eds.), 27-39.