# Estudio comparativo entre fracturación y karstificación en Sierra Gorda (Granada y Málaga)

Comparative study between jointing and karst in Sierra Gorda massif (Granada and Málaga)

López Chicano M.\*,\*\*; Pulido-Bosch A.\*

\* Departamento de Geodinámica (Univ. Granada)

\*\*Instituto Andaluz de Geología Mediterránea (CSIC - Univ. Granada) Grupo Alpino Espeleológico Lucentino (GAEL, Lucena, Córdoba)

### Resumen

El estudio de la fracturación del macizo kárstico de Sierra Gorda (Zonas Externas o Márgen Sudibérico de las Cordilleras Béticas) se lleva a cabo con ayuda de datos tomados en campo y sobre fotografía aérea. Las medidas de campo son tratadas de acuerdo con métodos microtectónicos. El mapa de fracturación, realizado a partir de fotografías aéreas, se analizó con ayuda de métodos computerizados una vez digitalizado.

Estas técnicas permiten caracterizar la intensidad direccional de la fracturación y su relación con los diferentes estados de estuerzo. Las principales familias de fracturas encontradas son: NO-10 E, N40-50 E, N90-100 E y N140-150 E. El análisis microtectónico distingue claramente al menos dos fases de fallamiento, una compresiva con el máximo esfuerzo en posición E-O y otra de distensión radial, pero con máxima extensión en dirección NE-SO.

El estudio estadístico de las direcciones principales de desarrollo de galerías kársticas conocidas en el macizo refleja una coincidencia casi perfecta con los sistemas de fracturas, si bien, la máxima intensidad de karstificación obtenida corresponde a las fracturas E-O, tratándose de un paleokarst desarrollado en la franja no saturada del karst. Según el modelo evolutivo que se propone, las familias N 140-150 E y N 0-10 E serían las últimas que han podido actuar en distensión, por lo que su papel en la karstificación actual del macizo debe ser importante.

Palabras clave: Fracturación, mapa de fracturas, microtectónica, karstificación, direcciones de galerías kársticas.

#### Abstract

The study of the fracturing in the Sierra Gorda karstic massif (External Zones or South-Iberian Domain of the Betic Cordillera) has been carried out with data gathered in the field and from aerial photographs. In handling the field measurements, microtectonic methods have been used. The fracture map, drawn from aerial photographs, was first digitalized and then analysed by computer aided methods.

These techniques provide a characterization of the fissural directional intensity and its relation to the different stress states. The major orientation classes of fractures found are: N 0-10 E, N 40-50 E, N 90-100 E and N 140-150 E. The analysis of tectonic micro-structures show clearly a minimum of two faulting phases. The first one is compressive with the greatest stress near the E-W strike. The second one implies a general radial extension, although with a dominant extension in the NE-SW strike.

The statistical study of directions of known karstic galleries in the massif show a near perfect coincidence with the systems of fracture above mentioned, nevertheless the fractures E-W are the most karstified corresponding to a paleokarst developed in the unsaturated zone of the karst. According to the evolution model proposed, the sets N 140-150 E and N 0-10 E appear to be the last to have extended, and would therefore play an important role in the present karstification.

key words: Fracturing, fracture map, microtectonic, karstification, direction of karstic galleries.

## INTRODUCCIÓN

Situado en el extremo occidental de la provincia de Granada y en el límite con la de Málaga, Sierra Gorda constituye uno de los macizos kársticos más extensos de Andalucía (293 km<sup>2</sup> de afloramientos carbonatados). Desde el punto de vista geográfico comprende las sierras de Loja, Gorda (s.str.) y parte de la de Alhama. Su morfología plana, la gran pureza de las calizas, la intensa fracturación y una pluviometría relativamente alta, son factores que han contribuido al desarrollo de un bello y diversificado palsaje kárstico. Cabe señalar la existencia de varios poljes, entre los que destaca el de Zafarraya, funcional y uno de los más extensos de la Península Ibérica. Asimismo, existen varios miles de dolinas o torcas de pequeñas dimensiones, y una decena de manantiales con caudales medios superiores a 100 l/s. Se conoce más de un centenar de cavidades, algunas de las cuales se encuentran entre las más profundas de la provincia de Granada (GONZÁLEZ RIOS, 1992)

La porosidad y permeabilidad "primarias" que manifiestan los materiales rocosos carbonáticos de Sierra Gorda son, por regla general, muy bajas. La karstificación en profundidad sólo es posible a favor de las discontinuidades presentes en esas rocas. Estas discontinuidades capaces de contener y transmitir el agua son fundamentalmente superficies de estratificación y, sobre todo, fracturas de origen tectónico.

Las superficies de estratificación son planos de discontinuidad de las rocas que se extienden, en general, sobre grandes distancias y hasta los límites de las masas carbonatadas. En condicio-

nes favorables de exposición pueden actuar como lugares de entrada efectiva de agua (infiltración) y de circulación profunda (DREYBRODT, 1988), siempre que presenten una permeabilidad suficiente como para permitir el inicio de la circulación del agua y, por tanto, el comienzo de la corrosión. Se conoce muy poco sobre el papel que pueden llegar a jugar estas superficies en la karstificación. Globalmente, su importancia en regiones fuertemente plegadas y fisuradas, debe ser pequeña y más limitada frente a la de las discontinuidades de origen tectónico, cuyos efectos destacan sobre los de las primeras.

Las fracturas son la respuesta frágil de las rocas ante determinados esfuerzos tectónicos. Son superficies de discontinuidad de dimensiones muy variables, desde la escala microscópica hasta la escala del centenar de kilómetros. Su disposición, frecuentemente vertical, favorece notablemente la penetración y la circulación del agua; no obstante, el comportamiento varía según los tipos de fracturas, el funcionamiento, su orientación, etc.

En este artículo pretemos dar a conocer los resultados del análisis de la fracturación del macizo de Sierra Gorda, entendiendo por fracturación el conjunto de discontinuidades, esencialmente de origen tectónico, hayan tenido o no movimiento (fallas o diaclasas, respectivamente). Este tipo de estudios presenta un gran interés, ya que el agua se mueve a través de fracturas, a favor del gradiente hidráulico, y parece lógico pensar que la karstificación se verá facilitada a través de aquel o aquellos juegos cuya disposición y condiciones de abertura sean más favorables. Más adelante se detallarán los procedimientos empleados en la adquisición de la información fisural, basados esencialmente en un análisis puntual de las direcciones de fractura en estaciones de medida y en un análisis global de los campos de fracturas interpretados a partir de fotografías aéreas. La identificación de las etapas de fallamiento y de los campos de esfuerzos que las caracterizaron se ha llevado a cabo mediante el análisis microestructural, utilizando, fundamentalmente, estrías de fallas y diaclasas de tensión medidas en estaciones sobre el terreno. Todos los datos son integrados en el contexto geodinámico regional, en orden a establecer una cronología para las fases de fracturación.

La karstificación en los macizos carbonáticos es un fenómeno que se sobreimpone a las superficies de discon-



Foto 1 Paso en oposición en una fractura ensanchada por la circulación del agua Complejo Sima Rica-Redil (Sierra Gorda). Foto: M. López Chicano



Foto 2 Dolinas asimétricas alineadas según una fractura en Sierra Gorda Foto: M. López Chicano

tinuidad antes mencionadas, ensanchándolas por el efecto de corrosión que ejerce el agua infiltrada sobre la roca encajante (foto 1). El resultado es la aparición de una "nueva estructura" en el macizo, en el sentido de que amplía la estructura fisural previa de manera selectiva. El estudio de la organización espacial de las redes kársticas subterráneas permite aproximarse al conocimiento del modo en que se produce la circulación del agua subterránea en el Karst, puesto que estas redes están ligadas a "ejes" de mayor permeabilidad.

A partir de los trabajos de KIRALY (1969), diversos estudios ponen de manifiesto la estrecha relación existente entre la orientación de cavidades kársticas y la estructura geológica (GUE-RIN, 1973; GRILLOT, 1979) (Foto 2). Algunos autores llegan incluso a proponer el análisis de las redes kársticas topografiadas como método utilizable en los estudios puramente tectónicos (JASKOLLA y VOLK, 1986). La naturaleza, organización y distribución de la red de fracturas original controla en buena medida el desarrollo preferencial y selectivo de la estructura kárstica de los macizos carbonatados (KIRALY y SIMEONI, 1971). Determinados juegos de fracturas pueden ser, por su apertura y por su densidad (DREYBRODT, 1988), favorables a la penetración y circulación del agua, facilitando la disolución y karstificación de la roca almacén.

Por todo ello se deduce que el análisis direccional de las cavidades de Sierra Gorda puede aportar datos interesantes para el conocimiento del desarrollo y evolución de la karstificación del macizo. Este análisis ya fue objeto de una comunicación al Il Congreso Geológico de España (LÓPEZ CHICANO y PULIDO BOSCH, 1988), si bien, en aquella ocasión los resultados fueron interpretados a la luz de los conocimientos tectónicos regionales que existían, y no fueron comparados con datos de fracturación propios de Sierra Gorda, cuestión que fue abordada por LÓ-PEZ CHICANO (1989 y 1992) y que será sintetizada de nuevo en este trabajo.

# MARCO GEOLÓGICO GENERAL

Desde el punto de vista geológico, Sierra Gorda se sitúa en el sector central de las Cordilleras Béticas, concretamente en las Zonas Externas o Margen Sudibérico, muy próxima al contacto con las Zonas Internas o Dominio de Alborán (figura 1). El macizo está constituido por dos unidades estratigráfica y tectónicamente distintas (VERA, 1966):

### LÓPEZ CHICANO M., PULIDO-BOSCH A.

la unidad de Sierra Gorda (s.str.), perteneciente al dominio Subbético interno, y la unidad de Zafarraya, difícil de asignar a un conjunto geológico concreto (MARTÍN ALGARRA, 1987). Ambas unidades tienen, como rasgo común, el disponer de una serie estratigráfica mavoritariamente compuesta por materiales calizos y dolomíticos de edad Trías superior a Lías medio (Formación Gavilán), cuyo espesor real es desconocido, aunque supera los 1000 m con toda seguridad. En el caso de la unidad de Sierra Gorda (la de afloramientos más extensos), sobre todo en su sector meridional (figura 2), el techo de esta formación carbonatada presenta indicios de paleokarstificación de una antigüedad superior a 175 millones de años, con paleocavidades y diques neptúnicos fosilizados (GARCÍA HERNANDEZ, et al., 1986-87).

En conjunto, Sierra Gorda se muestra como un gran domo alargado según la dirección N-S, resultado de la superposición de dos sistemas de plegamiento con ejes de dirección N 150 E y N 30-50 E (LUPIANI y SORIA, 1988). La mayoría de los investigadores (VERA, 1966; ELORZA y GARCÍA DUEÑAS, 1979) suponen que la unidad de Zafarraya cabalga sobre la de Sierra Gorda, aunque el contacto estaría retocado por fallas normales que hundirían a la primera respecto a la segunda. Realmente, este contacto es muy vertical, aunque en el sector occidental se aprecia cómo la unidad de Sierra Gorda se superpone ligeramente, mediante fallas inversas y de desgarre, a la unidad de Zafarraya. Ambas unidades aparecen afectadas de una intensa fracturación y karstificación que serán objeto de análisis detallado en este trabajo.

## ANÁLISIS DE LA FRACTURACIÓN

## Sobre el Terreno

Hemos realizado mediciones de orientación de fracturas en 35 estaciones, repartidas lo más homogéneamente posible, a lo largo del sector de estudio. De éstas, 31 se ubicaron sobre afloramientos carbonatados de las unidades de Sierra Gorda, Zafarraya y Rondaides de los Baños de Alhama; las 4 restantes corresponden a medidas realizadas sobre materiales postorogénicos.

El número total de medidas (principalmente diaclasas o fallas de pequeño salto) fue de 3.289 fracturas. Por estación, el número de datos osciló entre 50 y 177. Las fracturas no verticales (buzamiento menor de 70°) o curvas fueron



Figura 1

Unidades y dominios geológicos presentes en Sierra Gorda y su entorno: 1, Complejo Alpujárride; 2, Complejo Maláguide; 3, Dorsal Bética o Rondaides; 4, Complejo Colmenar-Periana; 5, Trías de Antequera; 6, Unidad de Zafarraya; 7, Unidad de Sierra Gorda; 8, Unidad del Hacho de Loja; 9, Penibético; 10, Complejo de la Alta Cadena; 11, Unidad de Zalia; 12, Formación Tajea; 13, Formación Santana; 14, materiales neógenos y cuaternarios postorogénicos. Poblaciones: L, Loja; S, Salar; M, Moraleda de Zafayona; A-G, Alhama de Granada; Z, Zafarraya; A, Alfarnate; P, Periana.



Series estratigráficas sintéticas de los sectores Norte y Sur de la unidad de Sierra Gorda

# FRACTURACIÓN Y KARSTIFICACIÓN EN SIERRA GORDA

muy raras. Ambos tipos no fueron utilizados en el tratamiento.

En cada estación se distinguió además la litología, dirección y buzamiento dela estratificación, espesor medio de los estratos, dirección de recorrido, apertura de las fracturas, separación entre fracturas, existencia o no de rellenos y naturaleza de los mismos. Todas las medidas de orientación se hicieron con brújula, descontando 6º de declinación magnética. En la mayor parte de las estaciones, las condiciones de afloramiento impidieron realizar mediciones según dos direcciones ortogonales, como era lo aconsejable (KIRALY, 1969); buena parte de ellas se situaron en cortes subverticales: canteras, taludes de carreteras y ferrocarril, y túneles. En todos los casos se anotó la dirección del itinerario seguido y la longitud del mismo; este último osciló entre 10 m y 50 m. Por regla general no se midieron microfracturas; salvo raras ocasiones la mayoría de las mediciones se realizaron sobre fracturas decamétricas.

La representación de los datos de orientación de fracturas se hizo en todos los casos sobre histogramas circulares tipo "diagramas en rosa", con intervalos de clase de 10°. No se ha abordado, de momento, el estudio de la densidad de fracturación, debido, en parte, a las malas condiciones de la mayoría de los afloramientos, en general desarrollados en una sola dirección.

Se puso de manifiesto una gran variabilidad entre los resultados de cada estación, como cabría esperar en una zona fuertemente deformada donde las estructuras mayores, pliegues y fallas de grandes dimensiones, afectan localmente a la distribución direccional de los máximos relativos de las fracturas medidas. Asimismo, el propio sistema de muestreo elimina aquellos máximos que se pudieran producir en la dirección del recorrido. Por todo ello, la representatividad de los mismos es muy escasa si se consideran de forma aislada. Es conveniente trabajar con los datos agrupados para el conjunto del macizo. Así, observando el diagrama correspondiente al conjunto de las estaciones ubicadas sobre materiales carbonatados mesozoicos (histograma general en la figura 3), se puede deducir la presencia de al menos 4 máximos de orientación de fracturas -frente a un gran "ruido de fondo"-, que son: N-S, ligeramente más marcado hacia N 10-20 E; N 40-50 E, en general, bien definido; N 90-110 E; y N 130-150 E, con una cierta dispersión.

Para el conjunto de las estaciones

ubicadas en las calizas de la unidad de Sierra Gorda, las familias de fracturas más frecuentes coinciden en buena medida con la distribución general, salvo el máximo N-S que aquí aparece desglosado en dos: N 170-180 E y N 10-30 E. El resto de los máximos, N 40-50 E, N 90-110 E y N 130-150 E aparecen, si cabe, con mayor nitidez. Hay que resaltar la gran dispersión existente en este sector entre la dirección N 90 E a N 150 E.

En la unidad de Zafarrava el número de estaciones y el de fracturas medidas (712 fracturas) es considerablemente menor que en la unidad de Sierra Gorda, aunque hay que tener en cuenta que la superficie que ocupa esta última es a su vez mayor que la de aquélla. Para la unidad de Zafarraya se observan también 5 familias predominantes: N-S a N 10 E: N 40-50 E: N 80-110 E: N 120-140 E; y N 150-170 E. Salvo los máximos N 40-50 E y N 80-110 E, los 3 restantes se encuentran ligeramente rotados respecto a los equivalentes en la unidad de Sierra Gorda. Esta rotación relativa de ciertas fracturas acompaña en cierta forma a la disposición arqueada en planta de la unidad de Zafarraya, la cual rodea por el Oeste y por el Sur a la unidad de Sierra Gorda, siguiendo direcciones que van desde NO-SE a casi E-0.

Respecto a las fracturas medidas en los materiales postorogénicos, éstas se agrupan en dos máximos principales relativamente bien marcados: N 40-60 E y N 150-170 E; aparece un ligero máximo secundario, N 70-90 E, que denota la influencia de una única estación algo anómala. En general, estos dos sistemas de fracturas, que forman un ángulo agudo de 60° aproximadamente, deben constituir algunos de los sistemas de fracturas de más reciente formación, probablemente de edad Mioceno terminal o posterior.

## Sobre fotografía aérea

El análisis de la fracturación visible sobre fotografía aérea ha ocupado una parte muy importante del tiempo utilizado en este estudio. Según GRILLOT (1979 y 1984), la utilización de los datos fotogeológicos se revela como una herramienta indispensable en el conocimiento de las principales familias de fracturas, así como de su longitud, densidad, etc.; y sirven de complemento ideal a las observaciones realizadas sobre el terreno, ya que desde el punto de vista estadístico el número de datos es muy superior.

El paso previo en todo análisis de fracturación sobre fotografía aérea consiste en la realización del **Mapa de Fracturación**, a partir de la interpretación de fotografías aéreas en visión estereoscópica. La escala de las fotografías utilizadas fue la 1:18.000. Para cada fotograma se realizó la interpretación dibujando, sobre un papel superponible de tipo *kodatrace*, la traza de los lineamientos susceptibles de constituir



#### Figura 3

Diagramas de distribución direccional de fracturas en las unidades de Sierra Gorda Zafarraya, en el conjunto de ambas (General) y para los materiales postorogénicos del entorno, a partir de las medidas de campo fracturas; solamente se utiliza la parte central de la fotografía, a fin de eliminar los errores introducidos por la distorsión de la imagen hacia los bordes. Seguidamente se realiza el montaje de todos los fragmentos en un único documento que constituiría el mapa de fracturación.

Posteriormente se procedió a digitalizar el mapa (con un tamaño aproximado de 1,20 m por 1,50 m), obteniéndose un total de 42.352 trazas o lineaciones. Este proceso consiste en la numerización de las fracturas, recogiendo sobre un sistema de coordenadas de ejes ortogonales previamente definido el valor de la abcisa y de la ordenada de cada extremo de las mismas. De esta forma, cada fractura tiene definida su longitud y su situación espacial mediante un sistema de 4 puntos.

Por último, una versión en lenguaje BASIC del programa RAFRAC (RA-ZACK, 1984) permitió obtener los parámetros elementales cuantitativos que identifican a la fracturación (orientación y longitud).

En la figura 4 se representa la distribución direccional de las fracturas, según el número de fracturas (A) y según las longitudes acumuladas (B) para el total del macizo carbonatado, así como para las unidades de Sierra Gorda y de Zafarraya. Es llamativo el gran parecido existente entre los histogramas correspondientes a las dos modalidades de expresión de la intensidad de fractura-

ción, indicando, de forma cualitativa, la gran correlación que existe entre los valores expresados en número de fracturas y los expresados en longitudes acumuladas de fracturas, para cada familia direccional. RAZACK (1979), investiga las relaciones entre estos dos modos de expresión mediante métodos estadísticos de regresión lineal, concluvendo en que esta relación es fuertemente lineal y positiva, de forma que el parámetro intensidad de fracturación puede ser expresado de una u otra manera, indiferentemente. En el caso de Sierra Gorda, los coeficientes de correlación lineales eran altos, oscilando entre 0,69 y 0,97, para intervalos de confianza del 95 %. Los valores más bajos correspondían sistemáticamente a los subsectores con menor número de datos.

Los histogramas circulares que agrupan todos los datos de orientación (General) de fracturas que aparecen en la figura 4 (A y B) son esenciales para el conocimiento de la estructura fisural del macizo de Sierra Gorda. Una observación minuciosa de los mismos pone de manifiesto las principales familias de fracturas que existen en el macizo:

-Fracturas de orientación N-S a NO-10 E. En general, se trata de fracturas largas (175 m de longitud media).

-Fracturas **N 50-70 E**. Constituye un máximo bien definido y muy uniforme, en cuanto a número de fracturas y longitudes acumuladas.



Figura 4



-Fracturas **N 90-100 E**. Aunque no son muy frecuentes en la fotografía aérea, suele tratarse de fracturas de grandes dimensiones (longitud media de 183 m).

-Fracturas N 140-150 E. Son fracturas muy abundantes, aunque no especialmente largas. Pueden llegar a confundirse con las fracturas N-S.

Respecto a la unidad de Sierra Gorda, esos máximos direccionales se mantienen idénticos, si cabe más definidos aún, lo que pone de manifiesto el gran peso de la fracturación de esta unidad (29.904 fracturas) sobre el conjunto del macizo. La unidad de Zafarraya (12.304 fracturas) presenta ciertas diferencias respecto a los máximos antes citados: por una parte se observa que está presente el máximo N-S, caracterizado aquí también por grandes fracturas; el máximo N 50-70 E se observa de forma poco clara y presenta una gran dispersión; el máximo N 90-100 E es muy tenue aquí, tanto en número de fracturas como en longitudes acumuladas; se observa un máximo N 140-150 E que pasa gradualmente hacia la dirección N-S, sin que ambos se puedan disociar claramente. En la unidad de Zafarraya, las fracturas N 140-150 E predominan sobre otras familias.

Como ilustración de lo expuesto anteriormente, la figura 5 muestra un fragmento del mapa de fracturación correspondiente al sector más alto del macizo, donde las cuatro familias de fracturas definidas se muestran con gran claridad.

## Comparación entre los datos de campo y de fotografía aérea

Dado el carácter del tratamiento que se ha realizado sobre los datos de campo y de foto aérea, la comparación de los mismos hay que hacerla teniendo en cuenta los histogramas de distribución de la intensidad de fracturación expresada en número de fracturas, tanto para el conjunto de materiales carbonatados, como para las unidades de Zafarraya y de Sierra Gorda. En general, los diagramas correspondientes a los datos de foto aérea (figura 4 A) muestran un mayor "ruido de fondo" que los correspondientes a los datos de campo (figura 3), debido a que el número de fracturas empleadas es mucho mayor en el primer caso. Si se compara el histograma general de los datos de campo (figura 3) con los de fotografía aérea (figura 4 A) se observa que no existe una correspondencia de las magnitudes relativas de cada máximo.

Llama la atención, por ejemplo, que



## Figura 5

Mapa de fracturación en el sector nororiental del Pico Santa Ľucía (Sierra Gorda). Se muestra la distribución direccional de las fracturas (A, en número; B, en longitudes acumuladas)

el máximo N 90-110 E definido en los datos de campo, aunque presente en la fotointerpretación, no tiene en ésta la relevancia y la importancia que adquiere en el primer caso. Este hecho se ha puesto de manifiesto también en estudios realizados en otras áreas (BENA-VENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985). El máximo N 130-150 E que aparece en los datos de campo corresponde sin duda al N 140-150 E de los datos de fotografía aérea. Los máximos N 10-20 E para las estaciones de campo y N 0-10 E del mapa de fracturación coinciden aproximadamente, con una decena de grados de desplazamiento. Por último, la familia N 50-70 E, bien marcada en la fotografía aérea, podría corresponder "grosso modo" con la N 40-50 E de los datos de campo, aunque existe una desviación notable entre ambos, que bien pudiera ser debida a influencias de la litología. En general se puede considerar que existe una buena coinciden-



Medición de planos de fallas y estrías para el análisis de las fases de fallamiento, en una cantera próxima a la Venta del Rayo (Sierra Gorda). Foto: J. Galindo Zaldívar

cia en la orientación de las distintas familias de fracturas puesta de manifiesto por ambos métodos.

En lo que respecta a la unidad de Sierra Gorda, se pueden hacer las mismas consideraciones que para el conjunto del sector estudiado; únicamente cabe destacar un pequeño pico de dirección N 170-180 E, que se individualiza en los datos de campo, pero que debe corresponder a la familia N-S, en sentido amplio.

Para la unidad de Zafarraya, la morfología de los histogramas es considerablemente distinta (figuras 3 y 4 A), del hecho de que la distribución de los datos de foto aérea presenta una gran dispersión. Existe coincidencia en los histogramas, respecto a la aparición de un máximo N-S a N 10 E. Al igual que para el total del área, se manifiesta un desplazamiento entre el máximo N 40-50 E de los datos de campo y el N 50-70 E de los datos de foto aérea. El máximo E-O está presente en ambos diagramas, aunque muy mal definido en el mapa de fracturación. Por último, en los datos tomados sobre el terreno se manifiestan dos picos en la dirección NO-SE (N 120-140 E y N 150-170 E), el primero de los cuales podría corresponder al N 140-150 E de los datos de fotografía aérea que se presenta aquí en tránsito hacia la dirección N-S.

# Estudio microtectónico. Etapas de fallamiento

El análisis de las microestructuras tectónicas permite precisar la naturaleza de los datos de la información fotogeológica y de campo. Con este fin llevamos a cabo un estudio microtectónico en estaciones puntuales de medida. La ausencia casi generalizada de estructuras estilolíticas en el macizo, probablemente debido a la gran pureza de los materiales carbonatados, obligó a considerar principalmente las estrías de falla y los planos que las contenían (foto 3), así como diaclasas de tensión con rellenos calcíticos.

Realizamos un total de 114 medidas de planos de falla y sus correspondientes estrías, sobre 9 estaciones de campo distribuidas a lo largo del macizo de Sierra Gorda (figura 6). En los casos en que fue visible se anotó el sentido de movimiento de las estrías. La mayor parte de las estaciones se ubicó en cortes frescos de canteras, trincheras de carretera o ferrocarril, túneles, etc.; las medidas para cada estación se realizaron en sectores muy concretos y puntuales, con distancias de recorrido muy cortas, a fin de evitar el tomar medidas en áreas con distinto elipsolde de esfuerzos. Las medidas de orientación de diaclasas de tensión se realizaron de forma sistemática en aquellas estaciones en que fueron visibles; asimismo, se han utilizado otras medidas dispersas, tomadas, fundamentalmente, a lo largo de las campañas de medición de orientación de fracturas sobre el terreno.

El método seguido en la determinación del campo de esfuerzos asociado a cada fase de fallamiento es el propuesto por GALINDO y GONZÁLEZ LO-DEIRO (1988). Estos autores describen suficientemente el fundamento de la metodología, por lo que no nos extenderemos aquí sobre este tema. Simplemente se puede indicar que se trata de un método que identifica los estados de esfuerzos correspondientes a etapas de fallamiento, mediante una red de búsqueda entre todas las combinaciones posibles que existen de las variables que definen dichos estados.

Para cada estación se obtuvieron los diagramas de densidad, tanto de planos de fallas como de estrías, como ayuda a la diferenciación y determinación de fases de fallamiento. En la tabla 1 se resumen los principales resultados del análisis microestructural para cada una de las estaciones de medida.

Considerando el conjunto de las estaciones de medida se puede llegar a la conclusión de que existe una fase de fallamiento, más o menos generalizada, con razones áxicas menores de 0,5 -y, en general, menores de 0,3-, en la que el máximo eje de esfuerzos se situaría próximo a la dirección E-O, con oscilaciones desde la dirección ENE-OSO a ESE-ONO. Se asigna a esa dirección el máximo eje de esfuerzos, ya que en algunas estaciones (números 1, 3, 6, 8 y 9) está contenido en el plano de las diaclasas de tensión con rellenos calcíticos o de espeleotemas. Se trata, pues, de una etapa claramente compresiva.

Existe otra etapa de fallamiento caracterizada por un eje de máximos esfuerzos subvertical (fase 2 en la estación nº 1, y estación nº 7). Esta etapa implicaría una distensión radial generalizada, aunque el predominio de diaclasas de tensión, orientadas en el intervalo que va desde la dirección N 90 E hasta la dirección N-S (cuadrantes NO y SE), parece indicar una tensión preferente en dirección NE-SO. También se observa que existen otras etapas de fallamiento, aunque, por falta de datos asignados o por la mala calidad de éstos, no las hemos tenido en cuenta.



Figura 6 Localización de los puntos en los que se realizaron medidas microtectónicas

## Síntesis de resultados

En este apartado intentaremos realizar una síntesis de todos los datos estructurales obtenidos en el macizo de Sierra Gorda, integrando también los datos que se poseen sobre el contexto regional. Este intento debe ser considerado como aproximado, ya que existen muchas lagunas de información que no son más que el reflejo de la gran complejidad de la evolución geodinámica del sector.

Anteriormente hemos distinguido 4

familias principales de fracturas en Sierra Gorda: N-S a N 0-10 E, N 40-50 E, N 90-100 E y N 140-150 E. Algunas de estas familias coinciden en gran medida con los sistemas definidos a escala regional por diversos autores (SANZ DE GALDEANO, 1983 y 1985; BENAVENTE v SANZ DE GALDEANO, 1985). Los datos obtenidos en el estudio microtectónico no han proporcionado datos definitivos sobre las etapas de deformación del sector, por el contrario, han demostrado una gran complejidad en este sentido. La atribución de una determinada familia de fracturas a un estado de esfuerzos concreto es difícil en muchos casos; ello se complica aún más debido a los rejuegos de estas fracturas ante los sucesivos cambios de la posición del elipsoide de esfuerzos.

En general, se puede considerar que las primeras fases de fracturación de los materiales son las que se produjeron durante el Lías medio y buena parte del Jurásico superior, las cuales ocasionaron la ruptura de la gran plataforma carbonatada en la que se depositaron los carbonatos del Lías inferior y medio. Estas paleofracturas marcan el comienzo de un *rift* intracontinental que individualizó bloques, algunos de los cuales llegaron a emerger y se karstificaron parcialmente.

La primera fase de deformación alpina constatada en Sierra Gorda, viene caracterizada por pliegues de dirección N 30-50 E, lo que indica que el máximo eje compresivo se situaba en una posi-

ESTACION		<b>S</b> -1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	<b>S-</b> 7	S-8	S-9
NOMBRE		Baños de Alhama	Alhama de Granada	Boquete de Zafarraya	Ventas de Zafarraya	Zafarraya	Loja	Plines	Venia del Rayo	Charoo del Negro
FASE 1	AJUSTE	Malo	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Bueno	Malo	Bueno
	RAZON AXICA	0,49	0,16	0,28	0,42	0,03	0,26	0,09	0,39	0,05
	σι	N 90 E, 60°	N 82 E, 6°	N 277 E, 1°	N 144 E, 44°	N 73 E, 22°	N 282 E, 5°	N 192 E, 74°	N 260 E, 12°	N 145 E, 4°
	5	N 357 E, 2°	N 351 E, 6°	N 11 E, 68°	N 28 E, 24°	N 282 E, 65°	N 19 E, 50°	N 295 E, 4°	N 146 E, 47°	N 236 E, 9°
	FALLAS DOMINANTES	NNE-SSO, 70° al O	normales y dextras, N 80 E, subvert.	normales, N-S, subverticales			NO-SE, 60° al NE			
	CARACTER	Distensiva	Compresión E-O	Compresión E-O	Compresión o distensión (?)	Compresiva	Compresiva	Extensión radial o ENE	Compresiva	Compresiva
	OBSERVAC.	Triaxia)	Estrías subhoriz. o inclinadas 40° al NE	Diaclasas N 120 E, 60° al SO		estrías E-O subhorizontales	Diactasas N 120-160 E	Diaclasas N 150-160 E, subverticales		Diaclasas coincidentes con $\sigma_1$
FASE 2	AJUSTE	Bueno	Malo		Bueno				Bueno	
	RAZON AXICA	0,59	0,66		0,68			1	0,66	
	σι	N 223 E, 74°	N 284 E, 16°		N 78 E, 12°	1			N 126 E, 4°	
	5	N 326 E, 4°	N 29 E, 42°		N 180 E, 45°	1			N 34 E, 22°	
	FALLAS DOMINANTES	normales y sinistras N 60 E, 70° al SE								
	CARACTER	Distensión, radial o NO-SE								
	OBSERVAC.		Pocos datos		Sólo 6 datos				Pocos datos	

Tabla 1

Resumen de los resultados obtenidos en el análisis microtectónico, para cada estación de medida

ción SE-NO. Junto a estos pliegues, el sistema de esfuerzos es compatible con la creación de fallas de desgarre, con componente vertical, de dirección E-O (familia N 90-100 E) que actuarían como fallas dextras. También sería posible que se hubieran generado en esta fase algunas de las fracturas de dirección N 140-150 E que actuarían bien en distensión o como fallas de desgarre sinistras (BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985), dependiendo de la exacta orientación del eje de máximos esfuerzos. Una nueva fase de carácter frágil-dúctil dio lugar a la formación de pliegues de orientación N 150 E, con el máximo eje de esfuerzos en dirección N 60 E y sentido hacia el SO, lo cual daría lugar a la formación de: los plieques antes citados, cuya expresión más clara es la inversión de la serie de la unidad de Sierra Gorda que se observa en los alrededores del pico Cabras; las fallas inversas asociadas a esa estructura y las del contacto entre la unidad de Zafarraya y la de Sierra Gorda; las fracturas de dirección N 50-70 E que actuarían en distensión, probablemente según juegos conjugados de fallas normales que delimitarían fosas como la del Rincón de Alcaudigue o la depresión de Pilas Dedil.

Una ligera oscilación hacia la dirección E-O del máximo eje compresivo (fase compresiva E-O, manifestada en el estudio microtectónico) pudo hacer que las fracturas E-O, antes formadas, actuaran ahora de forma distensiva. Por otra parte, en este estado de esfuerzos es posible que el juego de fracturas de dirección N 140-150 E sufriera una reactivación y funcionara como un sistema de fallas de desgarre sinistras (MARTÍN ALGARRA, 1987); asimismo las fracturas N 50-70 E pudieron rejugar como fallas de desgarre dextras, aunque no existe ninguna evidencia de ello.

Estas fases de deformación son anteriores al comienzo del Mioceno superior. A partir de ese momento y hasta la base del Cuaternario, domina una etapa de distensión radial a NE-SO, en la que las fracturas N 140-150 E actúan como distensivas. Esta distensión puede estar asociada a un acortamiento generalizado NNO-SSE (SANZ DE GALDEA-NO, 1983 y 1985; BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO, 1985) con oscilaciones hacia N-S, que explicaría la aparición de fracturas N 0-10 E y que haría funcionar las fracturas N 140-150 E como fallas de desgarre dextrosas; no obstante, estas fracturas han podido caer dentro de un campo distensivo por la oscilación del máximo eje de esfuer-ZOS.

## ANÁLISIS DE LAS DIRECCIONES PREFERENCIALES DE KARSTIFICACIÓN

## El paleokarst mesozoico

El techo de la formación carbonatada del Lías inferior y medio de la unidad de Sierra Gorda constituye una importante discontinuidad estratigráfica de extensión regional. LUPIANI y SORIA (1988) reconocen la discontinuidad por un cambio notable de la litología, así como por los siguientes rasgos: hard grounds (sobre todo en el sector Norte), relieve paleokárstico, diques neptúnicos y otros rellenos de cavidades y fisuras, brechas sinsedimentarias y heterocronía de los materiales. GARCÍA HERNANDEZ et al. (1986-1987) distinguen 4 discontinuidades más desde ésta y hasta el techo del Jurásico, siendo la intracarixiense y la ruptura de la base del Dogger las que presentan los principales rasgos paleokársticos. Entre estos últimos, dominan los diques neptúnicos encajados en las calizas blancas.

El relleno de las paleocavidades está constituido por brechas formadas por cantos de calizas blancas liásicas principalmente; rara vez por crinoiditas y calizas pelágicas del Lías superior. Tapizando la pared de estas paleocavidades aparecen espeleotemas de espesor centimétrico. Se observa frecuentemente un primer sedimento de material limoso-calcáreo laminado por decantación, que es interpretado como material de origen continental (GARCÍA HER-NANDEZ et al., 1986-87; VERA et al., 1988). El resto del relleno de los diques o la matriz de las brechas es un sedimento pelágico de probable edad Jurásico medio.

Las morfologías se ven claramente a lo largo del carril que cruza Sierra Gorda desde Zafarraya hasta Loja, especialmente en el tramo situado al suroeste del pico Cazadores. Se pueden observar grandes bolsadas de material brechiforme o limoso-calcáreo de color amarillento, que interrumpen, localmente, la continuación de la estratificación. No obstante, las formas predominantes son las de fisuras con desarrollo vertical, perpendiculares frecuentemente a la estratificación, las cuales llegan a observarse incluso a 100 m por debajo del techo de la formación de calizas blancas. Esta gran abundancia de digues verticales invitaba a realizar un estudio sistemático de la orientación de los mismos, en orden a tener una idea de las direcciones de paleokarstificación que dominaron. A este respecto, realizamos medidas de orientación de los diques así como de la estratificación, cada vez que ésta última cambiaba por efecto de pequeñas fallas.

La mayoría de los planos de los diques se disponían perpendicularmente a la estratificación, siendo raros aquellos que formaban un ángulo menor de 60° con ésta. Sobre falsilla de Wulff se llevaron a la horizontal los planos de la estratificación y se rotaron los planos de los diques neptúnicos contenidos en la misma. Se midió la nueva orientación de los diques en esta posición v se representaron los datos relativos a porcentajes en un histograma circular (figura 7). El número total de medidas realizadas fue de 119. A la vista del diagrama consideramos los siguientes máximos de orientación de diques neptúnicos:

-N 60-70 E, constituido por planos con buzamientos originales entre 40° al SE y verticales.

-N 130-140 E, de planos verticales; forma un ángulo de 70° con el anterior.

-N 100-110 E, muy bien marcado, constituye la bisectriz del ángulo formado por los dos juegos anteriores. Los planos eran subverticales.

Otros picos que se observan en el diagrama -como el N 80-90 E - pueden ser debidos a posibles errores de medida, dadas las dificultades que conllevaba obtener la orientación real midiendo sobre un plano vertical (trinchera del camino). Estas direcciones preferentes de paleokarstificación irían asociadas a un sistema de paleofracturas congruente con un régimen de desgarre en el que los ejes de esfuerzo máximo y mínimo se dispondrían subhorizontales con direcciones N 105 E y N 15 E, respectivamente.

En el histograma de la figura 7 se observa una cierta coincidencia con los sistemas de fracturas principales determinados para el conjunto de Sierra Gorda. Es posible que determinados accidentes paleogeográficos antiguos hayan condicionado el emplazamiento de la fracturación durante la etapa orogénica alpina, como sugiere MARTÍN ALGA-RRA (1987). De aquí se deriva el interés del estudio de la orientación de estas "paleofracturas".

## El karst subactual. Orientación de cavidades

A fin de comparar la tectónica de fractura con el desarrollo de la karstificación subactual, realizamos un estudio estadístico sobre la dirección de las galerías de las cavidades kársticas conocidas en el sector de Sierra Gorda.

El método empleado (GUERIN,





Figura 7 Direcciones preferentes de paleokarstificación de Sierra Gorda durante el Jurásico medio (diques neptúnicos).

1973; GRILLOT, 1979; JASKOLLA y VOLK, 1986) consiste en dibujar la red de galerías -tramos rectilíneos o ejes de galerías con desarrollo especialmente en la horizontal- a partir del dibujo "en planta" de las topografías espeleológicas de las cavidades publicadas (GON-ZÁLEZ RÍOS et al., 1982 y 1983; MARIN MALDONADO et al., 1983, MENJÍBAR et al., 1989; GONZÁLEZ RÍOS, 1992) o cedidas por la SGEG, el GES de la SEM y el GEI, a quienes quisiéramos mostrar nuestro agradecimiento. En la figura 8 se muestra un ejemplo de trazado de la red kárstica correspondiente al complejo Sima Rica-Redil; esta cavidad presenta el mayor desarrollo horizontal conocido hasta el momento (511,7 m).

El trazado de tramos rectilíneos se realizó tras la observación minuciosa de cada topografía, atendiendo especialmente al aspecto de las secciones transversales (foto 4), forma del contorno de la cavidad, presencia o ausencia de formaciones secundarias (depósitos estalactíticos, sedimentos arenosos, derrumbes, etc.). No fueron interpretados los pasos en espiral, pasos meandriformes y grandes salas con hundimientos. Fue necesario orientar los planos según el Norte geográfico, descontando la declinación magnética correspondiente a la fecha de ejecución de los mismos. Se utilizaron 77 topografías de otras tantas cavidades. Se midió la longitud y la dirección de 219 tramos rectilíneos de las correspondientes redes kársticas establecidas.

La longitud total acumulada del conjunto de tramos rectilíneos es de 2.920,7 m, lo que da una densidad media teórica de la red kárstica muy pequeña, del orden de 10 m de galerías por km<sup>2</sup>, si se considera toda la superficie del karst (293 km<sup>2</sup>). Pese a todo, hemos realizado un estudio estadístico teniendo en cuenta, por un lado, los datos puntuales de direcciones, y por otro, las longitudes acumuladas de galerías por intervalo direccional, y representando los datos en forma de histogramas circulares (figura 9).

Respecto a las características de las cavidades utilizadas en el análisis estadístico, hay que señalar que presentan una distribución irregular a lo largo del macizo. La mayoría se localiza en la unidad de Sierra Gorda, en una banda central de dirección E-O. La altitud media de las bocas de entrada es de 1325 m s.n.m., con desviación típica de 182 m. La máxima profundidad penetrada es de 149 m, en la Sima de los Machos. Ninguna cavidad alcanza el nivel freático del macizo y no existen cursos de aqua subterránea perennes o temporales, exceptuando algunos de los sumideros penetrados en el polje de Zafarrava (foto 5). Por lo tanto, se trata de una



Red de galerías kársticas del Complejo Sima Rica-Redil

red inactiva, fósil. Dominan las cavidades verticales excavadas a favor de diaclasas de 1 m de abertura media, sumideros de dolinas y cavidades desarrolladas a favor de la estratificación, aunque estas últimas siempre con un marcado control estructural.

Los resultados del análisis estadístico de las direcciones y longitudes acumuladas de las galerías kársticas (figura 9) muestran una repartición fraccionada en varios máximos, agrupados como sigue:

-N 0-10 E: presenta un pico poco marcado pero bien individualizado.

-N 50-60 E: es un máximo relativamente bien individualizado. Presenta una gran homogeneidad en cuanto a equilibrio entre número de galerías (figura 9 A) y longitud acumulada de las mismas (figura 9 B).

-N 80-100 E: en el histograma de longitudes acumuladas muestra un máximo muy marcado, siendo el sistema de mayor longitud relativa penetrable.

-N 110-140 E: la dispersión angular es muy grande y no existe una alta correlación entre el histograma de longitudes acumuladas y el de número de galerías. Nuestra opinión es que debe corresponder, esencialmente, a un sistema de dirección N 140 E, pero que presenta desviaciones hacia la posición E-O, mostrando grandes galerías en ese sentido.

# CONCLUSIONES

LÓPEZ CHICANO y PULIDO BOSCH (1988) comparan las direcciones preferentes de karstificación antes expuestas con los datos de fracturación a escala regional. En este momento, es posible realizar la comparación de la karstificación preferente con la fracturación predominante en el mismo macizo de Sierra Gorda.

Si se comparan los histogramas de distribución de las fracturas obtenidas a partir de la fotografía aérea (histogramas generales de la figura 4) con los histogramas de distribución de orientación de las galerías kársticas (figura 9), se observa una coincidencia casi perfecta en lo que a sistemas de fracturas y sistemas de redes kársticas se refiere. Veamos caso por caso:

a) Comparación del diagrama de intensidad de fracturación, expresada en número de fracturas (figura 4 A, diagrama general) con el diagrama de intensidad de karstificación, expresada en número de galerías kársticas (figura 9 A): se observa que el máximo de fracturación N 0-10 E presenta una cierta karstificación, aunque no es la dominante;



Galería de sección subtriangular, desarrollada a favor de una fractura, en el Complejo Sima Rica-Redil (Sierra Gorda). Foto: M. López Chicano



Figura 9 Distribución de las galerías kársticas conocidas en Sierra Gorda, según número de galerías (A) y según la longitud acumulada de las mismas por familia direccional.

las fracturas N 50-70 E desarrollan asimismo una intensa karstificación, al igual que ocurre con las fracturas N 90-100 E y las N 140-150 E. Las desviaciones de los máximos de karstificación respecto a los de fracturación son mínimas.

b) Comparación del diagrama de intensidad de fracturación, expresada en longitudes acumuladas de fracturas (figura 4 B, diagrama general) con el diagrama de intensidad de karstificación, expresada en longitudes acumuladas de galerías kársticas (figura 9 B): en este caso se observa que las fracturas N 0-10 E presentan un grado muy bajo de karstificación; las fracturas N 50-70 E muestran un pico bien definido de intensidad de karstificación; las fracturas N 90-100 E que constituyen una familia tímidamente individualizada en cuanto a intensidad de fracturación, presentan, sin embargo, el máximo de karstificación. El sistema de fracturas N 140-150 E, en sentido estricto no muestra karstificación notable, al menos no se desarrollan grandes galerías; sin embargo, aparece un máximo de karstificación N 110-120 E. La explicación de este máximo de karstificación es difícil; tal vez se deba a que algunas fracturas de dirección N 140-150 E sufran una inflexión hacia posiciones E-O y éstas se encuentren bien karstificadas. Por otra parte, podría corresponder a fracturas del sistema E-O, algo desplazadas (10°) del máximo. Por último podría tratarse de un ligero error en los datos topográficos de base.

De todo lo dicho hasta ahora hay que resaltar que el máximo de karstificación lo presentan las fracturas N 90-100 E. Este hecho merece ser considerado detenidamente, ya que BENAVENTE y SANZ DE GALDEANO (1985) consideran que las fracturas E-O serían en las Béticas las que tendrían menor relevancia en la karstificación. En primer lugar, se trata de una red kárstica inactiva, por lo que hay que considerar que se desarrolló en épocas pasadas. La coincidencia con las fracturas N 90-100 E, el sistema de fallas más antiquo creado durante la orogenia alpina, lleva a pensar en qué momento este sistema actuó de forma distensiva. Efectivamente, parece ser que en las últimas etapas compresivas de la orogenia, el máximo eje de esfuerzos se encontraba aproximadamente en posición E-O, favorable a la apertura de las fracturas de igual orientación. Esta situación se mantendría aproximadamente hasta el Mioceno terminal, cuando una nueva fase de deformación produce una discordancia Miopliocena en el marco de un nuevo sistema de esfuerzos.

Durante el Mioceno superior, los sistemas de fracturas N 140-150 E v N 50-70 E ya estaban creados, siendo el segundo el sistema probablemente más distensivo, cuya formación supuso un cierre de las fracturas N 140-150 E. Durante las últimas etapas compresivas alpinas estos dos sistemas eran susceptibles de karstificarse, pero el máximo de karstificación se situaría, de todas formas, según la dirección E-O (máxima distensión). Los rasgos morfológicos del macizo, así como el carácter de los materiales que se depositaban en la depresión de Granada (calizas lacustres) parecen apoyar la idea de esta karstificación en el Mioceno superior (LÓPEZ CHICANO, 1992).

A partir del final del Mioceno no se conocen evidencias de cómo se desarrolló la karstificación en el macizo. El sistema de esfuerzos propuesto para este período y hasta el Cuaternario parece indicar una tendencia a la apertura de las fracturas N 140-150 E y las N-S,



Sumidero de El Calar en plena actividad (Polje de Zafarraya, macizo de Sierra Gorda). Foto: M. López Chicano

menos intensa en los sistemas N 90-100 E y N 50-70 E. Es muy probable que la red kárstica se haya encajado progresivamente durante el Plioceno y durante el Cuaternario (por el progresivo levantamiento del macizo), a favor de las fracturas "más abiertas", en dos o más etapas de máxima intensidad de la karstificación.

Si se considera la juventud que presenta el relieve de este sector de las Cordilleras Béticas, es lógico pensar que la red kárstica actual se encuentre en plena fase de desarrollo. En tanto no se consiga penetrar una red espeleológica activa, la determinación de sus características debe ser investigada por otros métodos geológicos o hidrogeológicos indirectos, de forma que se comprueben o rechacen las hipótesis planteadas.

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENAVENTE, J. y SANZ de GALDEANO, C. (1985). Relación de las direcciones de karstificación y del termalismo con la fracturación en las Cordilleras Béticas. Estudios geológicos, 41: 177-188.

DREYBRODT, W. (1988). Processes in Karst Systems. Physics Chemistry, and Geology. Springer Series in Physical Environment, 4, 288 p.

ELORZA, J.J. y GARCÍA DUEÑAS, V. (1979). Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1040 (Zafarraya) del Mapa Geológico de España a escala 1:50.000. I.G.M.E.

GALINDO, J. y GONZÁLEZ LODEIRO, F. (1988). Faulting phase differentiation by means of computer search on a grid pattern. Annales Tectonicae, 2 (2): 90-97.

GARCÍA HERNANDEZ, M.; LUPIANI, E. y VERA, J.A. (1986-1987). Discontinuidades estratigráficas en el Jurásico de Sierra Gorda (Subbético Interno, provincia de Granada). Acta Geol. Hisp.,

GONZÁLEZ RÍOS, M.J. (1992). Grandes cavidades de la provincia de Granada. Espeleotemas, 2: 19-36.

GONZÁLEZ RÍOS, M.J.; CALVO RODRÍ-GUEZ, M.; TORICES, S.M. y DÍAZ, M. (1983). Cavidades del sector -Alhama de Granada-(Complejo de Sierra Gorda). Spes, 3: 59-74.

GONZÁLEZ RÍOS, M.J.; MARIN, J.C.; CALVO, J.A. y CALVO, M. (1982). Cavidades del sector de Sierra Blanquilla (Sierra Gorda), Granada. Spes, 2: 58-76.

GRILLOT, J.C. (1979). Structure des systèmes aquifères en milieu fissuré. Contribution méthodologique à cette connaissance.-Thèse Doct., U.S.T.L., Montpellier, 212 p.

GRILLOT, J.C. (1984). Photo-interprétation à différentes échelles et relevés de terrain: exemples de corrélations structurales dans le Bassin Méditerranéen et sur le socle Ouest africain. Geologische Rundschau, 73 (2): 787-808.

GUERIN, R. (1973). Un exemple du rôle de la tectonique et de la microtectonique dans la géométrie des écoulements karstiques fossiles et actuels: le Bas-Vivarais calcaire. Thèse 3ème Cycle, U.S.T.L., Montpellier, 104 p.

JASKOLLA, F. y VOLK, P. (1986). Use of

cave-maps for tectonic surveys.- International Journal of Speleolology, 15: 15-40.

KIRALY, L. (1969). Statistical analysis of fractures (orientation and density).- Geologische Rundschau, 59: 125-151.

KIRALY, L. y SIMEONI, C.P. (1971). Structure géologique et orientation des cavités karstiques: la grotte de Chez le Brandt (Jura Neuchâtelois). Bull. Soc. Neuch. Sci. Nat., 94: 91-97.

LÓPEZ CHICANO, M. (1989). Geornetría y estructura de un acuífero kárstico perimediterráneo: Sierra Gorda (Granada y Málaga). Tesis de Licenciatura, Univ. Granada, 77 p.

LÓPEZ CHICANO, M. (1992). Contribución al conocimiento del sistema hidrogeológico kárstico de Sierra Gorda y su entorno (Granada y Málaga).- Tesis Doctoral, Univ. Granada, 429 p.

LÓPEZ CHICANO, M. y PULIDO BOSCH, A. (1988). Aproximación al conocimiento de las direcciones preferenciales de karstificación en el acuífero carbonático de Sierra Gorda (Granada). Il Congreso Geológico de España, 2 (comunicaciones): 403-406.

LUPIANI, E. y SORIA, J. (1988). Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1025 (Loja) del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000.- I.G.M.E.

MARÍN MALDONADO, J.C.; TORICES, S. y CALVO, M. (1983). Cavidades del sector de Santa Lucía (Sierra Gorda). Spes, 2: 77-87.

MARTÍN ALGARRA, A. (1987). Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 1171 p.

MENJÍBAR, J.L.; CASTRO, J.A. y MORE-NO, F. (1989). *El Torcón del Hoyo Hondo* (*Loja, Granada*). Andalucía Subterránea, 9: 17-21.

RAZACK, M. (1979). Approche numerique et quantitative de l'étude sur clichés aériens de la fracturation des reservoirs en roches fissurées. Rev. Inst. Fr. Petr., 34 (4): 547-574.

RAZACK, M. (1984). Application de méthodes numeriques et statistiques a l'identification des reservoirs fissurés carbonates en Hydrogéologie. Thése Docteur d'Etat, U.S.T.L., Montpellier, 257 p.

SANZ de GALDEANO, C. (1983). Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas.- Estudios geol., 39: 157-165.

SANZ de GALDEANO, C. (1985). La fracturación del borde Sur de la Depresión de Granada (Discusión acerca del escenario del terremoto del 25-12-1884).- Estudios geol., 41: 59-68.

VERA, J.A. (1966). Estudio geológico de la Zona Subbética en la transversal de Loja y sectores adyacentes.- Tesis Doctoral, Univ. Granada, 191 p.

VERA, J.A.; RUIZ ORTIZ, P.A.; GARCÍA HERNÁNDEZ, M. y MOLINA, J.M. (1988). Paleokarst and Related Pelagic Sediments in the Jurassic of the Subbetic Zone, Southern Spain.- In JAMES, N.P. and CHOQUET-TE, P.W. (Eds.): Paleokarst. Springer Verlag: 364-384.