

# Las fallas del recinto de la Alhambra

## *Faults in the Alhambra area*

J.M. Azañón <sup>(1)</sup>, A. Azor <sup>(1)</sup>, G. Booth Rea <sup>(2)</sup>, W. Martín Rosales <sup>(1)</sup>, J.L. de Justo Alpañés <sup>(3)</sup>, F. Torcal <sup>(4)</sup> y M. Espinar <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva, 18002 Granada

<sup>(2)</sup> GEOMAR, Wischhofstr. 1-3, D-24148 Kiel, Alemania

<sup>(3)</sup> Departamento de Medios Continuos, Universidad de Sevilla

<sup>(4)</sup> Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla

<sup>(5)</sup> Departamento de Historia Medieval e Instituto Andaluz de Geofísica, Universidad de Granada

### ABSTRACT

*The Alhambra is built on a conglomeratic formation, known as the Alhambra Formation, whose age is Pliocene to Lower Pleistocene and has a visible thickness of 200 metres. The western part of the San Pedro escarpment corresponds to a fault-scarp with some retreat; the fault-plane outcrops in the innermost part of the escarpment, showing normal displacement and NW-SE strike with NE steep dip. This fault is the most important one of a set that outcrops along the northern hillslope of the Alhambra. Several topographic steps with NW-SE orientation are interpreted as retreated fault-scarps. In some cases, the activity of these faults seems to be very recent and maybe related to earthquakes. The seismic risk associated with these faults (and maybe some not-outcropping ones) can be taken to be moderate, as some historical damages have been reported concerning the Alhambra walls and the fence. In this respect, the Alhambra fence has numerous cracks geometrically related to fault planes outcropping in the Alhambra Formation, i.e. faults and cracks are continuous and have similar strike and dip. We hypothesize that these cracks are due to small displacements along the faults, occurred during recent earthquakes in the region. These faults constitute mechanical discontinuities, which represent a supplementary risk, because they contribute to reduce the stability of the entire rock massif.*

**Key words:** Normal faults, coseismic activity, historical damages, seismic risk.

Geogaceta, 34 (2003), 159-162

ISSN:0213683X

### Introducción

El relleno de la cuenca de Granada (Fig. 1) ha sido en buena parte sincrónico de la actividad de fallas localizadas en su borde fundamentalmente, las cuales han controlado el depósito. Estas fallas son de carácter normal, dominando las de dirección NO-SE, con buzamientos hacia el SO y hundimiento de los bloques situados al SO. Al final del proceso de relleno de la cuenca, las fallas han producido el levantamiento de las formaciones sedimentarias depositadas al principio del proceso de relleno. Las relaciones entre las distintas formaciones de relleno de la cuenca son de discordancia en los bordes y paraconformidad hacia el centro; no obstante, en muchas localidades las relaciones que se observan actualmente son tectónicas (fallas normales).

El relieve actual en el borde de la Depresión de Granada, además de estar condicionado por la acción erosiva de los ríos (Genil, Darro, Monachil, etc.), es una consecuencia de la actividad de una serie de fallas. Estas fallas dan lugar a cambios bruscos en el relieve. Así, el límite entre

el sustrato de la cuenca y el relleno consiste siempre en fallas normales con buzamientos hacia el interior de la Depresión (Fig. 1), que se reconocen en el campo por la presencia de espejos de falla de dimensiones métricas a hectométricas. Además de estas fallas, se detectan varios escalones o saltos topográficos entre los materiales sedimentarios del borde de la Depresión y la zona plana que ocupa la vega de Granada, los cuales podrían representar escarpes de falla más o menos degradados por la erosión. Estos escarpes siguen direcciones predominantes NO-SE, en concordancia con la mayor parte de las fallas que se cartografían en el borde de la Depresión.

La actividad sísmica en la Depresión de Granada es alta, con un gran número de terremotos, pero todos ellos de magnitud moderada o baja ( $M_b \leq 5.5$ ) (de Miguel *et al.*, 1989). En tiempos históricos ha habido terremotos importantes con cuantiosos daños materiales (Tercedor, 1951), pero de magnitud difícilmente evaluable. La sismicidad tiene su origen a profundidades comprendidas por lo general entre 5 y 17 km (Serrano *et al.*, 2002) y los

mecanismos focales indican un estado actual de esfuerzos tensional con una dirección de extensión NE-SO. Esta dirección de extensión actual, junto a determinaciones de paleoesfuerzos en materiales tortonienses y más recientes, son perfectamente compatibles con la existencia de fallas normales de direcciones predominantes NO-SE, que indican la misma dirección de extensión (Galindo Zaldívar *et al.*, 1999).

### Estratigrafía de la Formación Alhambra

La colina sobre la que está situada la Alhambra y el Llano de la Perdiz, así como la ocupada por los barrios históricos del Sacromonte y el Albaicín, tiene como sustrato una formación conglomerática conocida como "Formación o Conglomerado Alhambra". Se trata de un gran paquete de conglomerados de unos 200 m de espesor visible, con la estratificación dispuesta horizontalmente o con ligero buzamiento hacia la Depresión de Granada. Esta formación ha sido interpretada como un depósito ligado a

abánicos aluviales coalescentes procedentes de los relieves situados al norte y este de la Depresión de Granada (Sierra Arana y Sierra Nevada). Su edad es, según Martín y Braga (1997), Plioceno basal, aunque para otros autores (Aguirre, 1957; Rodríguez Fernández *et al.*, 1989; Günster y Skowronek, 2001) es de edad Plioceno - Pleistoceno inferior. Litológicamente, la Formación Alhambra está formada por conglomerados heterométricos sin cementar con matriz arenosa-limosa y cantos de rocas metamórficas. Se reconocen algunos niveles de paleosuelos de colores rojizos intercalados (Günster y Skowronek, 2001). El espesor de los bancos es de 0.5 m a 2 m, con secuencias granocrecientes a techo (Martín, 2000). Los cantos pueden alcanzar varios metros cúbicos de tamaño.

### Fallas en el recinto de la Alhambra

En la ladera norte de la colina de la Alhambra, desde el Tajo de San Pedro hasta la Fuente del Avellano, se puede reconocer un buen número de fallas normales de dirección N130-N150°E y fuerte buzamiento (65-75°), tanto hacia el SO (dominante) como el NE (subordinado); en todos los casos las estrías se orientan según la línea de máxima pendiente del plano de falla. Los saltos de estas fallas están comprendidos entre algunos centímetros y algunos metros. En el Tajo de San Pedro, existe una falla de esta familia coincidiendo con la arista del diedro (Fig. 2), la cual tiene un salto mínimo de unos 3.5 m y es aproximadamente paralela al lado occidental del tajo (orientado aproximadamente N150°E); de hecho, este lado del tajo corresponde al escarpe de falla con un cierto retroceso debido a desprendimientos y otros procesos activos sobre la ladera. Estas fallas desarrollan una zona de falla en la que los cantos del conglomerado se reorientan hasta paralelizarse con la dirección de la falla (Fig. 3A). La matriz del conglomerado también se reorienta, observándose planos paralelos a las paredes de la zona de falla. Se reconocen también estriaciones, siempre según el buzamiento de los planos de falla. Además, en las zonas de falla y sus proximidades se observan cantos rotos por diaclasas de extensión (Fig. 3B); estas diaclasas tienen una orientación perfectamente compatible con la situación de esfuerzos que generó las fallas normales, por lo que las interpretamos como estructuras singénicas. Raramente, se observan también cantos rotos y

desplazados por las fallas (Fig. 3C), lo que se interpreta como un indicio de funcionamiento cosísmico. La estratificación en los conglomerados aparece en ocasiones rotada en el bloque de techo de las fallas; esta rotación es siempre contraria a la dirección de buzamiento de las fallas. En ocasiones, se reconocen pliegues de arrastre en relación con las fallas.

La actividad de estas fallas es posterior al depósito de la Formación Alhambra, es decir, posterior al Pleistoceno inferior si tomamos el rango de edades más jóvenes propuestas. En cualquier caso, es razonable atribuir a estas fallas una actividad cuaternaria o incluso actual, ya que no aparecen fosilizadas por ningún depósito. Su funcionamiento, como ya se ha dicho, ha podido ser cosísmico, de modo que las fallas acumularían desplazamientos como consecuencia de terremotos repetidos a lo largo del tiempo. En nuestra opinión, las fallas más importantes de este sistema, aparte de la del Tajo de San Pedro, estarían situadas sobre los escalones topográficos que se observan en toda esta zona de borde de la Depresión de Granada; así por ejemplo, una de estas fallas debe situarse transversal al Darro, separando, de un lado, el Cerro de San Miguel del barrio del Albaicín, al norte del río, y de otro lado, el Llano de la Perdiz de la colina de la Alhambra, al sur del río. El posible origen tectónico de estos escalones topográficos indicaría una edad muy reciente, ya que los procesos erosivos aún no habrían tenido tiempo de modelar el relieve generado en relación con las fallas.

### Discusión y conclusiones

El hallazgo de numerosas fallas de pequeño salto en el entorno de la Alhambra, algunas de ellas con rasgos que sugieren una actividad de carácter cosísmico, plantea el interrogante de la peligrosidad sísmica que conllevan y si han producido o no daños en los últimos siglos. La actividad de estas fallas debe ser posterior a 800.000 años, ya que ésta es la edad que se le atribuye a la parte superior de la Formación Alhambra, a la cual afectan. Desde un punto de vista morfológico, no se detectan escarpes o escalones topográficos atribuibles a estas fallas; sin embargo, al tener saltos muy pequeños (centimétricos en la mayor parte de los casos), su actividad podría ser muy reciente, pese a no tener escarpes asociados. En este sentido, los principales escalones topográficos del borde de la

Depresión de Granada, tienen la misma orientación que las fallas descritas y los interpretamos como escarpes de falla, que deben haber acumulado importantes saltos en los últimos 800.000 años.

Además de los datos que se acaban de mencionar, existen tres líneas de evidencia que apuntan hacia una actividad de estas fallas en el periodo histórico:

(i) *Grietas y roturas en la Cerca y la Muralla de la Alhambra*: la Cerca situada sobre el valle del río Darro en el bosque de San Pedro aparece agrietada o completamente rota en bastantes puntos. En algunos de esos puntos, las roturas tienen continuidad geométrica con los planos de falla aflorantes en el sustrato de la misma; en ocasiones, la rotura presenta el mismo buzamiento que la falla que aflora debajo. En la muralla también se han detectado grietas, algunas de las cuales están abiertas y evidencian desplazamientos relativos concordantes con los deducidos para las fallas. Las grietas detectadas en la Cerca se alinean con las de la muralla, según una dirección aproximadamente coincidente con la de las fallas; además, esa alineación coincide espacialmente con la posición de alguna de las fallas. Por tanto, es razonable atribuir algún tipo de actividad, aunque sea muy moderada, a estas fallas en los últimos siglos.

(ii) *Sismicidad en el periodo histórico*: Numerosos escritos históricos relatan que la Alhambra y su entorno han sufrido daños considerables ocasionados por terremotos ocurridos en 1431, 1526, 1778, 1822 y 1826 (Tercedor, 1951). Algunos de estos terremotos parecen haber tenido su epicentro en la ciudad de Granada, por lo que es razonable atribuirlos a movimientos a lo largo de fallas como las descritas en este trabajo u otras de la misma orientación.

(iii) *Mecanismos focales de terremotos recientes*: De entre los terremotos recientes en esta región de los que se dispone el mecanismo focal (Morales *et al.*, 1996), destaca el de 1984, que fue generado por una falla de la misma orientación y régimen que las aflorantes en el entorno de la Alhambra.

Cabe concluir, que el riesgo sísmico ligado a las fallas del entorno de la Alhambra debe ser moderado, ya que no se esperan terremotos de gran magnitud en esta región ( $M_b \leq 5.5$ ) y los daños históricos atribuibles a la actividad a lo largo de las fallas descritas nunca han sido importantes. Finalmente, las fallas del recinto de la Alhambra pueden jugar un papel importante como discontinuidades me-

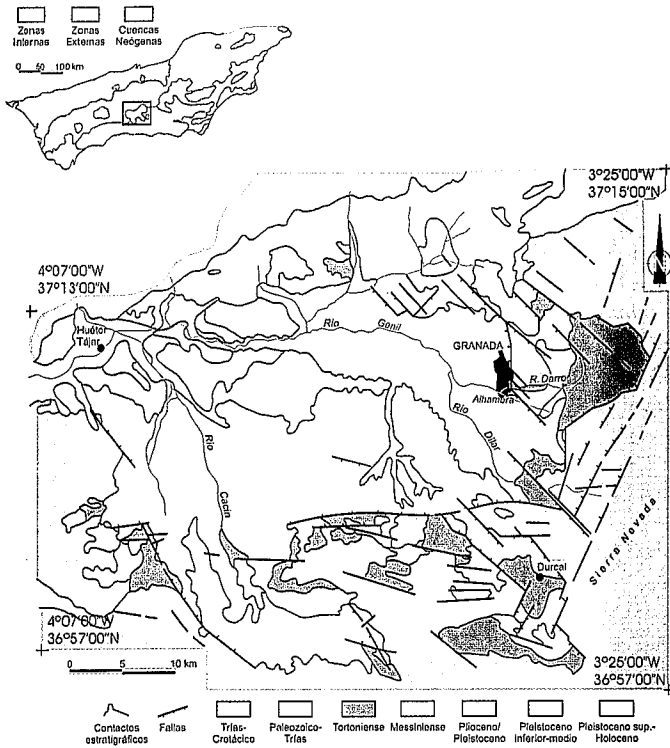


Fig. 1.- Mapa geológico simplificado de la Cuenca de Granada.

Fig. 1.- Simplified geologic map of the Granada Basin.

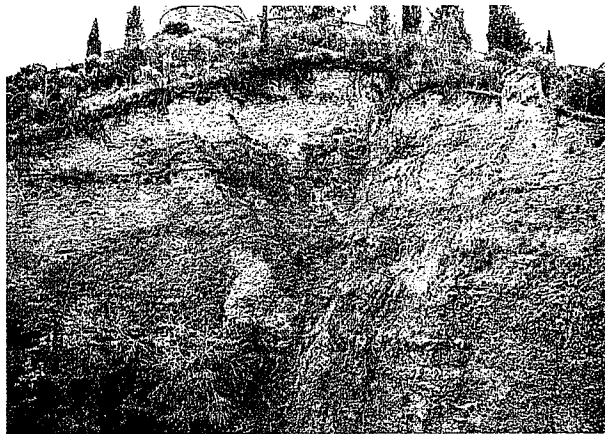


Fig. 2.- Interpretación geológica del escarpe del Tajo de San Pedro. Rojo: paleosuelo, verde: tramo arenoso-limoso, amarillo: tramo de conglomerados.

Fig. 2.- Geologic interpretation of the Tajo de San Pedro escarpment. Red: palaeosoil, green: sandy-silty bed, yellow: conglomerate bed.

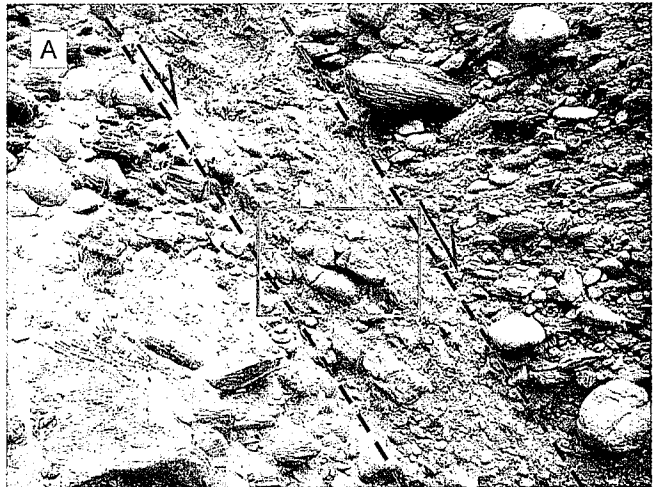
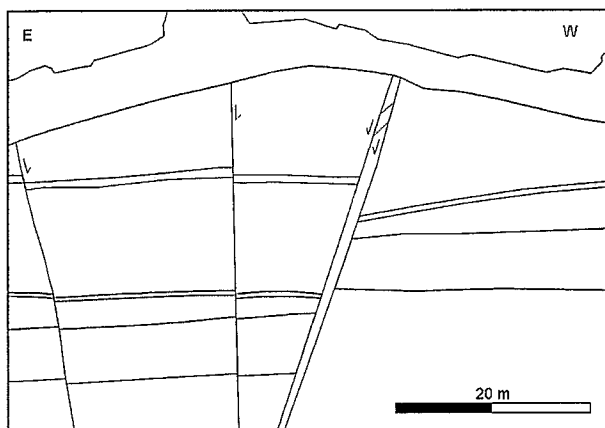


Fig. 3.- A) Cantos reorientados en una zona de falla de espesor decimétrico en la Formación Alhambra. B) Zona de falla en la que se observa un canto roto por una diaclasa de extensión. C) Canto roto y desplazado en una zona de falla.

Fig. 3.- A) reoriented pebbles in a decimetre-thick fault zone of the Alhambra Formation. B) Fault zone with a broken pebble. C) Broken and displaced pebble in a fault zone.

cánicas que pueden reducir la estabilidad del macizo rocoso produciendo daños en las construcciones ubicadas sobre él.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Patronato de la Alhambra y por el proyecto REN2001-3378/RIES de I+D+I del MCYT.

#### Referencias

- Aguirre, E. (1957): *Estudios Geológicos*, 13, 135-140.
- de Miguel, F. Vidal, F., Alguacil, G. y Guirao, J.M. (1989): *Geodinamica Acta*, 3, 87-94.
- Galindo Zaldívar, J., Jabaloy, A., Serrano, I. Morales, J., González Lodeiro, F. y Torcal, F. (1999): *Tectonics*, 18, 686-702.
- Günster, N. y Skowronek, A. (2001): *Quaternary International*, 78, 17-32.
- Martín, J.M. (2000): *Boletín Geológico y Minero*, 111, 47-60.
- Martín, J.M. y Braga, J.C. (1997): En *Avances en el conocimiento del Terciario Ibérico* (Calvo, J.P. y Morales, J., eds.), 117-120.
- Morales, J., Singh, S.K. y Ordaz, M. (1996): *Tectonophysics*, 257, 253-263.
- Rodríguez Fernández, J., Sanz de Galdeano, C. y Fernández, J. (1989): En *Intermontane basins: Geology and resources* (Thauasuthipitak, T.P. y Ounchanum, P., eds.), 294-305.
- Serrano, I., Zhao, D. y Morales, J. (2002): *Tectonophysics*, 344, 61-79.
- Tercedor, M. (1951): *Estudios Geológicos*, 7, 29-70.