



APLICACIÓN DE ÍNDICES GEOMORFOLÓGICOS AL ESTUDIO DE LA CUENCA DEL RÍO ADRA (ALMERÍA)

*Application of Geomorphic indices to the study of the basin of the
river Adra (Almería)*

Índices geomorfológicos en la cuenca del río Adra

Carvajal, R.¹ y Sanz de Galdeano, C.²

¹ SACYR, S.A.U. Centro de Conservación A-92, P.K. 230+400. 18320 Santa Fe (Granada)
rcarvajal@gruposyv.com

² Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-Univ. Granada). Facultad de Ciencias, 18071.
Granada csanz@ugr.es

Resumen: La aplicación de índices geomorfológicos indicadores de actividad tectónica (Sinuosidad del frente montañoso, índices del gradiente longitudinal del río, de encajamiento del río y de la forma de la cuenca) en la cuenca de Adra muestra la existencia de sectores tectónicamente activos. Destaca la presencia de dos frentes montañosos, el del sur de Sierra Nevada y el de Berja, directamente al oeste de Sierra de Gádor. En particular, el del sur de Sierra Nevada presenta importantes gradientes en los perfiles longitudinales de los ríos que lo cruzan, además de altos valores de encajamiento y cuencas muy alargadas. Estos resultados muestran el progresivo levantamiento de las sierras Nevada y Gádor. Destaca también la existencia de una zona de falla situada en el borde sur del corredor de las Alpujarras, bien marcada por varios índices y un proceso de antecedenencia en la estructura anticlinal situada al sur de la presa de Benínar, que se encuentra transversalmente cortada por el río Adra y que da valores muy altos en los perfiles longitudinales de los afluentes que allí desembocan.

Palabras clave: índices geomorfológicos, Tectónica reciente, cuenca de Adra, Almería, Cordillera Bética.

Abstract: The application of geomorphic indices indicators of active tectonics (*Mountain-front Sinosity index, Stream-length gradient index, Ratio of Valley floor width / Valley height, Ratio of basin wide*) in the Adra Drainage basin shows the occurrence, from the tectonic point of view, of several especially active sectors. Particularly stand out two mountainous fronts, in the south of Sierra Nevada and in the western border of Sierra de Gádor. That of the south of Sierra Nevada presents high gradients in the longitudinal profiles of the rivers crossing it, moreover high values in the ratios of valley-floor width to valley height and very elongated basins. These results indicate the progressive uplift of both sierras. Also stand out the existence of a fault zone situated in the south border of the Alpujarran Corridor, well marked by several indices and a process of antecedenencia in an anticlinal structure situated to the south of the Benínar damp, cut by the river Adra, showing very high values in the stream length-gradient index of the tributaries there flowing.



R. Carvajal & C. Sanz de Galdeano (2008). Aplicación de índices geomorfológicos al estudio de la cuenca del río Adra (Almería). *Rev. C. & G.*, 22 (1-2), 17-31.

Key words: Geomorphic indices, Recent Tectonics, Adra basin, Almeria, Betic Cordillera.

1. Introducción

El río Adra se sitúa en el sector sudoccidental de la provincia de Almería (Fig. 1). Por el norte su cuenca abarca parte de las laderas meridionales del sector central de Sierra Nevada, los límites este y oeste están formados respectivamente por las si-

erras de Gádor y de Contraviesa y al sur desemboca en el Mediterráneo en las proximidades de Adra.

Esta cuenca es la que se pretende analizar a través de la aplicación de varios índices geomorfológicos, con el fin de deducir la influencia respectiva de la estructura del sector, de su litología y de la actividad tectónica que le afecta.

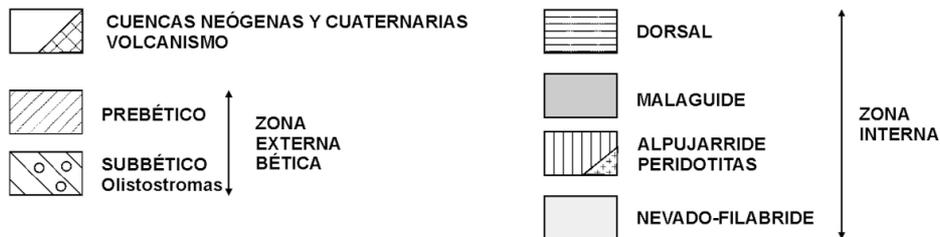
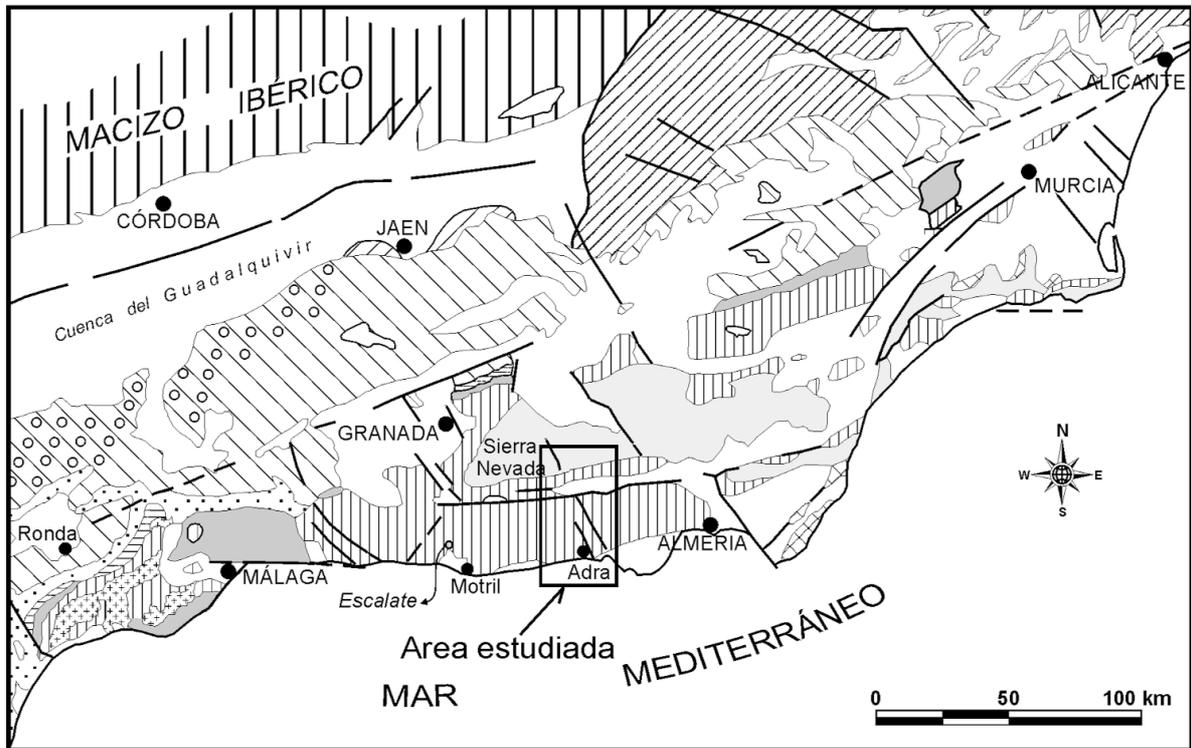


Figura 1. Localización de la cuenca hidrográfica de Adra en la Cordillera Bética. El recuadro marca la posición de la figura 2.
 Figure 1. Situation of the hydrographic basin of the Adra River in the Betic Cordillera. The square marks the position of figure 2.

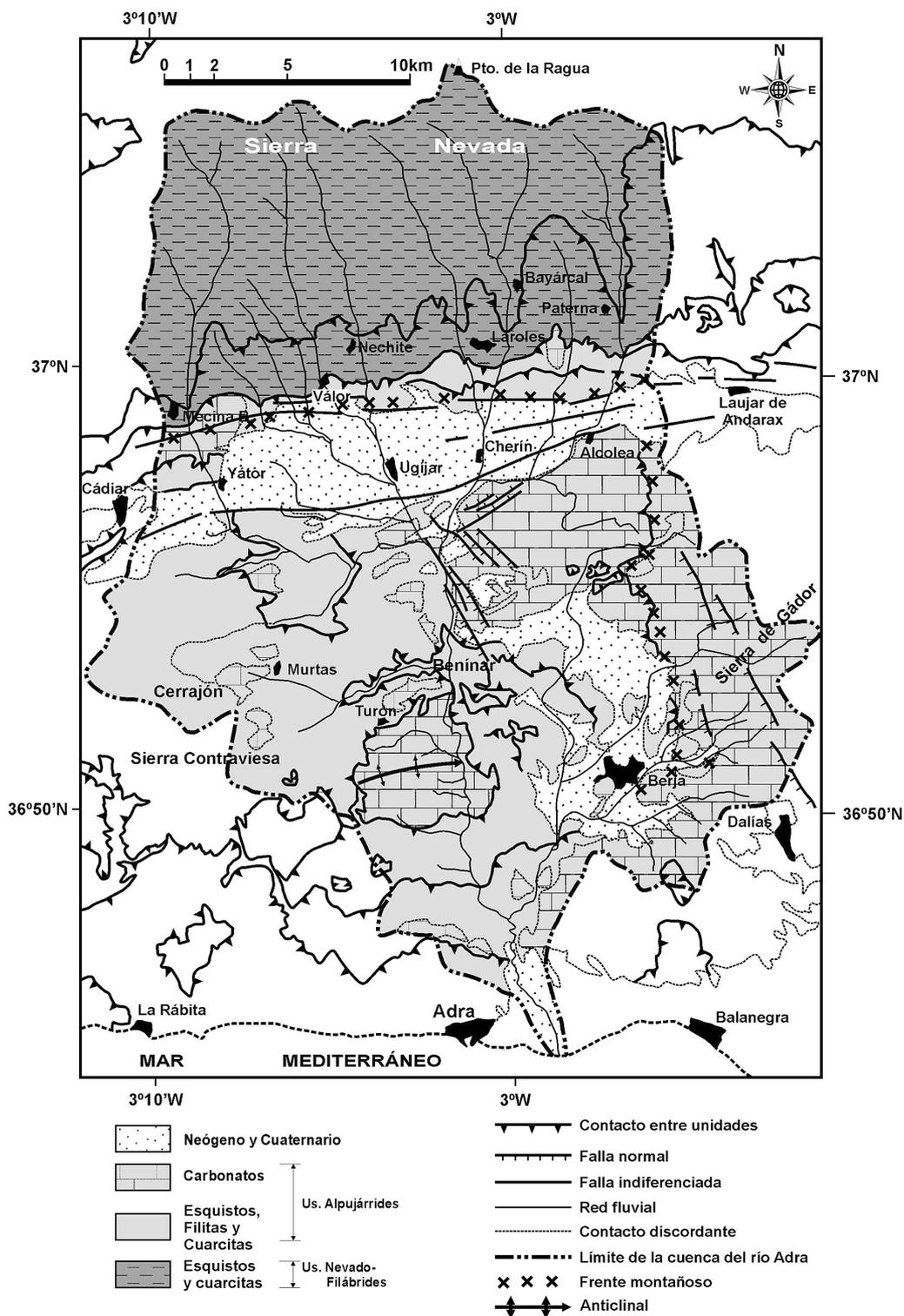


Figura 2. Esquema geológico del área ocupada por la cuenca de Adra. Su situación se señala en el recuadro de la figura 1.
 Figure 2. Geological scheme of the basin of the Adra river. Its situation is marked in the square of figure 1.

La aplicación de índices geomorfológicos al estudio de la actividad tectónica de una región es una herramienta generalizada hoy día (Rockwell et al., 1984 y Keller y Pinter, 1996). En concreto, en la Cordillera Bética ya han sido utilizados por diversos autores entre los que destacamos Silva (1994) en el área de Murcia, Silva et al. (2003) en el SE de España, incluido el sur de Sierra de Gádor, El Hamdouni (2001) en el sector de Dúrcal, al SE de Granada, Martínez Díaz (2000 a y b) en el SE de la península, en parte coincidiendo con el área ahora estudiada, además de otros como Carvajal y Sanz de Galdeano (2001) y Azañón et al. (2004) en el borde oriental de la cuenca de Granada. Generalmente se han aplicado a frentes montañosos activos o que al menos lo han sido durante el periodo neotectónico, unos 8 millones de años en la región (esta edad que abarca desde parte del Tortoniense a la actualidad, es la que generalmente se acepta para el periodo neotectónico en la Cordillera Bética y en general para el Mediterráneo (Groupe de Recherche Néotectonique, 1977). En esa edad se instauraron las condiciones geodinámicas que *grosso modo* existen aún en la actualidad).

1.1. Contexto geológico

El río Adra se sitúa en la Zona Interna Bética, la cual está formada por cuatro complejos, superpuestos tectónicamente, que de muro a techo son el Nevado-Filábride, el Alpujarride, el Maláguide y la Dorsal. Este último no aparece en el área estudiada y el Maláguide tan solo en pequeños afloramientos sin verdadero valor morfológico. Por eso no se han considerado en este estudio. Los dos primeros complejos han sido fuertemente afectados por la orogenia Alpina y están formados por rocas metamórficas: esquistos, cuarcitas, anfibolitas y algunos mármoles al techo en el Nevado-Filábride y los mismos materiales, además de filitas al techo de los esquistos, en el Alpujarride. En este último complejo, en este sector concreto, los mármoles están mejor representados.

El Nevado-Filábride aflora en Sierra Nevada y en este sector del norte de la cuenca del río Adra está formado por dos unidades tectónicas, (Fig. 2). Sierra Nevada se ha levantado fundamentalmente a partir del Tortoniense, Mioceno superior (Sanz de

Galdeano y Alfaro, 2004), dando al tiempo un gran antiforme de dirección E-O. La edad de este levantamiento queda demostrada por el hecho de que existen en las faldas de Sierra Nevada afloramientos tortonienses marinos someros a alturas cercanas a 1900 m, discordantes sobre el Alpujarride y los sedimentos de las cuencas situadas en sus bordes no recogen restos heredados de su núcleo nevado-filábride hasta el Tortoniense (Sanz de Galdeano y Alfaro, 2004). Este proceso de elevación continúa en la actualidad. Las alturas que alcanzan los sectores más altos del borde de la cuenca de Adra son próximas a 3000 m.

Al sur de Sierra Nevada (Fig. 2) se encuentra el corredor de las Alpujarras, sector netamente deprimido según la dirección E-O y limitado y cortado por fallas de desgarre dextrorsas E-O (Sanz de Galdeano et al., 1985; Martínez-Martínez, 2006), algunas de las cuales también presentan movimientos verticales, de falla normal. Este corredor se formó en materiales alpujarrides y se encuentra parcialmente relleno por otros del Mioceno medio y superior y del Plioceno, estos últimos quizás alcanzando también a parte del Pleistoceno y corresponden a conglomerados. Existen también depósitos fluviales ligados directamente a los cauces actuales. Sin embargo, abanicos aluviales o sedimentos de ladera bien diferenciados, no simples derrubios sin consolidar, no se conservan más que en las proximidades de Laujar de Andarax, prácticamente en el borde de la cuenca del río Adra donde la erosión ascendente de los tributarios del río Adra por el Sur y el Oeste y los del Andarax por el Este, aún no han llegado a hacerlos desaparecer. Están allí cortados por la falla de Laujar (García-Tortosa y Sanz de Galdeano, 2007). En el resto de la cuenca del río Adra, dentro del corredor de las Alpujarras, han sido erosionados. Las alturas del corredor oscilan entre los 900 m en numerosos puntos de las faldas de Sierra Nevada a los 375 m al SE de Ugíjar.

Al sur del corredor, el Alpujarride y algunos materiales del Mioceno superior y Pliocuaternario son los que conforman el sector situado entre las sierras Contraviesa y Gádor, ambas también alpujarrides. En este complejo se identifican varias unidades tectónicas, superpuestas previamente y sometidas a extensión con posterioridad, que han sido plegadas según laxos pliegues E-O a partir del

Mioceno superior, al igual que Sierra Nevada. Las alturas alcanzadas en Sierra de Gádor en su sector occidental, rebasan los 2000 m, mientras que en la Contraviesa son menores, pues el punto más alto se encuentra en el Cerrajón de Murtas con una altitud de 1.400 m. Numerosas fallas de dirección NNO-SSE limitan el borde oriental de la sierra de Gádor (Fig. 2). En este borde hay algunos depósitos de laderas y otros localmente ligados a los barrancos. Ya en el valle los depósitos aluviales y coluviales son más abundantes y en general se encuentran cultivados.

Principales rasgos morfológicos de la cuenca del río Adra: Esta cuenca, en congruencia con el contexto geológico, presenta en su sector norte, en Sierra Nevada, un conjunto de afluentes subparalelos y fuertemente encajados, dando subcuencas muy estrechas (Figs. 2 y 3). Todos ellos cruzan más o menos perpendicularmente el frente montañoso del sur de Sierra Nevada, donde producen roturas de pendiente importantes al llegar al corredor de las Alpujarras que constituye un sector deprimido, muy especialmente con respecto a Sierra Nevada. Ya en el corredor, los afluentes confluyen progresivamente. Primero se reúnen en dos grupos (Río Yátor con el de Ugíjar, y el río Alcolea con el de Lucainena al sur de Cherín) para finalmente confluir todos al sur de la localidad de Ugíjar, ya fuera del corredor.

A partir del punto donde se unen los cauces que descienden de Sierra Nevada, el río Adra se individualiza claramente, toma una dirección en conjunto N-S y comienza a recibir aguas de los afluentes del este (del fuerte relieve de Sierra de Gádor) y del oeste de la cuenca (del sector de Murtas, que da relieves menos importantes). Estos afluentes forman barrancos localmente encajados que erosionan fuertemente los materiales alpujárrides y que a su vez en no pocos casos están colgados con respecto al cauce principal que está en muchos puntos encajado, con fuertes incisiones locales y bruscas variaciones de pendiente, particularmente al sur de Benínar.

Ya cercano a su desembocadura el río Adra sigue excavando el cauce, si bien en la desembocadura ha formado depósitos que dan un delta en cuyo sector oriental presenta dos lagunas costeras.

2. Índices geomorfológicos indicadores de actividad tectónica

Hay numerosos índices geomorfológicos que permiten detectar la presencia de deformaciones tectónicas actuales. En este trabajo se usan aquellos que dan mejor información en dicho aspecto. Las escalas de los mapas usados suelen ser detalladas a medias. En el presente trabajo se ha utilizado la escala 1:25000. Los índices tratados son los siguientes:

a.- *Sinuosidad del frente montañoso* (Índice definido por Bull (1977, 1978) y Bull y MacFadden (1977) como *Mountain-front Sinosity index*).

$$S_{mf} = L_{mf} / L_s$$

Donde S_{mf} es el valor de la sinuosidad, L_{mf} es la longitud total real del frente montañoso y L_s es la longitud en línea recta medida entre los extremos del frente. Se define por tanto como la razón existente entre la longitud total del frente y la longitud del mismo medida a lo largo de una línea recta paralela al mismo. Este índice cuantifica la proximidad del frente a una morfología rectilínea, de tal forma que *cuanto más cercano al valor 1 se encuentre su valor, mayor será la actividad de la falla*, ya que ésta al actuar da lugar a un frente aproximadamente recto, que se hará más sinuoso a medida que pase el tiempo debido a la erosión que sufre. Es especialmente útil a la hora de clasificar los frentes según su actividad tectónica relativa, debido a su sencillez, y a que está sujeto a una escasa subjetividad, aunque a veces no es fácil determinar cuál es el frente montañoso o hasta dónde se considera el frente. Los valores obtenidos varían con la escala utilizada, siendo generalmente mayores en escalas pequeñas, pues las irregularidades se perciben menos.

b.- *Índice del gradiente del perfil longitudinal del cauce del río*

$$SL = (\Delta h / \Delta l) L$$

Donde SL significa *Stream-length gradient index*, definido por Hack (1973) es decir el Índice del gradiente del perfil longitudinal del río. Δh es el incremento (en realidad es un incremento negativo/disminución) de la altura (se puede tomar por

ejemplo una diferencia de 50 metros en cada caso) y Δl es la distancia en horizontal que corresponde en cada caso al Δh , y L es la longitud acumulada desde el punto inicial, cabecera del río, hasta el punto medio del intervalo considerado en cada caso. El índice SL es muy sensible a los cambios de pendiente del cauce, lo que permite la evaluación de las relaciones entre la actividad tectónica, la litología –mayor o menor resistencia de las rocas a la erosión– y la topografía. Con la representación del perfil del río podría bastar pues ahí se ven los cambios de pendiente, pero el interés del índice es que “exagera o detecta”, mostrando mucho mejor la posición de esos cambios de pendiente, e incluso dando un valor numérico del valor del cambio de gradiente.

Este índice se complementa con la representación semilogarítmica de un perfil longitudinal teórico del río. Tiene la siguiente fórmula:

$$H = C - K \ln L$$

Donde H es la altura, L la distancia desde la cabecera del río, y C y K son constantes. K se refiere a la pendiente del canal teórico y es el índice de gradiente, y responde a la fórmula:

$$K = \frac{H_i - H_j}{\ln L_j - \ln L_i}$$

Donde i y j son dos puntos escogidos a lo largo del perfil del río.

Silva (1994) construye mapas de contornos de SL. Para ello une puntos de valores similares de SL lo que da curvas de diferentes valores. Naturalmente, las de mayores valores corresponden a lugares donde hay que buscar una mayor actividad tectónica actual o semiaactual. Hack (1973) explica bien el método y sus rasgos asociados.

c. Relación anchura/altura del valle

O sea, es la relación entre la anchura del fondo del valle y la altura de las laderas del valle, medidas en una sección transversal. Fue definido por Bull (1977, 1978) y Bull y McFadden (1997) como *Ratio of Valley floor width / Valley height*.

$$V_f = 2V_{fw} / [(E_{ld} \cdot E_{sc}) + (E_{rd} \cdot E_{sc})]$$

Donde V_f es el índice a obtener, o valor del encajamiento, V_{fw} es la anchura del cauce del río (se suele tomar un valor mínimo de ancho de

cauce, en nuestro caso hemos tomado el valor de 20 m al trabajar con escalas de 1:25.000), $(E_{ld} \cdot E_{sc})$ es la diferencia de cota máxima de la ladera derecha del valle, en la transversal realizada, menos la cota a la que allí está el cauce del río; y $(E_{rd} \cdot E_{sc})$ es lo mismo, pero en la ladera izquierda. Es obvio que cuanto más ancho sea el río y menos altas las divisorias de su cuenca de drenaje, mayor será el valor del índice obtenido. Valores menores a 1 pueden ser indicativos de actividad tectónica. Naturalmente, en un mismo río, los valores de este índice cambian según las transversales, de modo que para caracterizar un río de una forma representativa habría que hacer varias.

Para que haya homogeneidad de datos conviene obtener el índice en puntos equivalentes de los ríos. Al contrario de lo que ocurre con el Índice del gradiente, cuanto más alto sea el Índice de encajamiento de un río menor actividad neotectónica indica; por el contrario, los valores más bajos son los que indican mayor excavación del mismo.

d. Índice de la forma de la cuenca

$$B_s = B_l / B_w$$

Donde B_s es el índice de la forma de la cuenca, en planta, y B_l y B_w son respectivamente la longitud y la anchura de la cuenca. Cuanto mayor sea el valor obtenido en el índice (cuencas alargadas), más jóvenes son las cuencas, lo cual suele estar ligado a una mayor actividad tectónica del tipo que sea. Con el tiempo y conforme la erosión avanza, las cuencas tienden a ser más amplias en relación a su longitud. Fue definido por Canon (1976) y Ramírez-Herrera (1998).

Medimos la longitud mayor de la cuenca y su anchura media para calcular el valor del B_s según la dirección predominante de la misma. En algunos casos existen importantes cambios de dirección que se tienen en cuenta, calculando un nuevo valor del índice para esa nueva dirección o rumbo. El cálculo de la medida de la longitud y de la anchura de cada cuenca se ha hecho tomando valores intermedios. Sobre todo en el caso de la anchura, que es la que más irregularidades presenta normalmente. Los valores más altos corresponden a una mayor actividad tectónica: coinciden con formas alargadas de la cuenca.

3. Aplicación de los índices geomorfológicos en la cuenca del río Adra

a.- Sinuosidad del frente montañoso:

En la cuenca del río Adra se definen dos frentes montañosos (Fig. 3): del sur de Sierra Nevada, de dirección aproximada E-O y de Berja, casi N-S en su conjunto.

El frente del sur de Sierra Nevada

Se encuentra en el borde norte del corredor de las Alpujarras, con una dirección aproximada E-O a ENE-OSO y se prolonga al este y al oeste de la cuenca del río Adra. Desde Lanjarón a Alboloduy tiene una longitud aproximada de 113,1Km, considerando todas sus sinuosidades en un mapa de escala 1:25.000, y la línea recta imaginaria paralela es de 78,3km, lo que da un S_{mf} medio de 1,44. Dentro del área estudiada, la longitud del frente montañoso da un valor de 31,125km y la línea recta paralela al frente su longitud es de 22,5km. El resultado del índice S_{mf} es de 1,38 en el sector de la cuenca del río Adra.

La distribución de la red de drenaje cambia mucho del norte al sur de este frente. En él o en sus proximidades se encuentra el paso del Nevado-Filábride al Alpujárride que sigue aproximadamente la traza de una banda de fallas dextrorsas casi E-O (Fig. 2) que pone en contacto diversas unidades tectónicas, con diferentes litologías, lo que produce netas diferencias topográficas.

Conviene señalar que en el borde sur del corredor de las Alpujarras existen fallas importantes que, sin formar un verdadero frente, controlan parte de dirección de los ríos y del propio relieve (Figs. 3 y 4).

El frente de Berja

Este frente se observa desde las proximidades de Berja hacia el norte y se desarrolla en el borde occidental de la Sierra de Gádor. Limita al norte con el corredor de las Alpujarras, desde donde toma una dirección N-S (Fig. 3); más al sur pasa a tener una dirección aproximada a N125° E; más adelante vuelve a ser N-S pero bastante más sinuosa, para terminar bifurcándose en una nueva dirección N 72° E, constituyendo el límite con la *cuenca del Campo de Dalías*.

La longitud de este frente montañoso da los siguientes valores: L_{mf} igual a 34,625km, L_s de 21km, lo que da un índice S_{mf} igual a 1,65.

Lo atraviesan barrancos de dirección predominante de E-O, que al llegar a materiales neógenos en las inmediaciones de Berja, desvían su curso a una nueva dirección NE-SO ó N-S, paralela al río principal: río Grande o río Adra. Este frente está formado por la combinación del contacto entre unidades alpujárrides y las fallas NNO-SSE de ese sector. En este frente se encajan profundamente varios de los ríos que lo atraviesan, algunos de los cuales tiene localmente depósitos detríticos, generalmente coluviones, que en algún caso forman terrazas colgadas varios metros (estos coluviones y otros depositados en laderas están cortados algún caso por las fallas citadas, tal como se observa en dos puntos de la pista principal que asciende por el SE de la Sierra de Gádor).

Con los anteriores datos, el frente de Sierra Nevada es el que tiene una mayor actividad, aunque todos ellos muestran escarpes de falla que afectan a depósitos recientes, tal como se acaba de indicar en el frente de Berja o como observa en el frente de Sierra Nevada, en la falla de Laujar (García-Tortosa y Sanz de Galdeano, 2007).

b.- Índice del gradiente del perfil longitudinal del cauce del río

Los valores más altos de los índices se dan en el entorno del frente montañoso del sur de Sierra Nevada (Figs. 3 y 5), siendo el mayor de ellos de 3.258 cerca de la localidad de Paterna situada en la zona nororiental de la cuenca del río Adra y sobre el río del mismo nombre, seguido de otros valores también altos como son: 2.742, 2.677 (junto a Mecina Bombarón), 2.554, 2.158 (cerca de Laroles), además de otros que superan valores superiores a 2.000 y de 1.500.

Estos valores altos coinciden principalmente con dos rasgos: A) cambios litológicos dentro del Nevado-Filábride, así la existencia de paquetes importantes de niveles cuarcíticos intercalados entre los esquistos. B) el contacto entre los mantos del Veleta y del Mulhacén (Fig. 5, perfiles 1, 3, 4 y 5), éste situado sobre el anterior, y el que corresponde a las fallas E-O que en algunos sectores separan exactamente el Nevado-Filábride y Alpujárride y en otros se sitúan cerca de ese con-

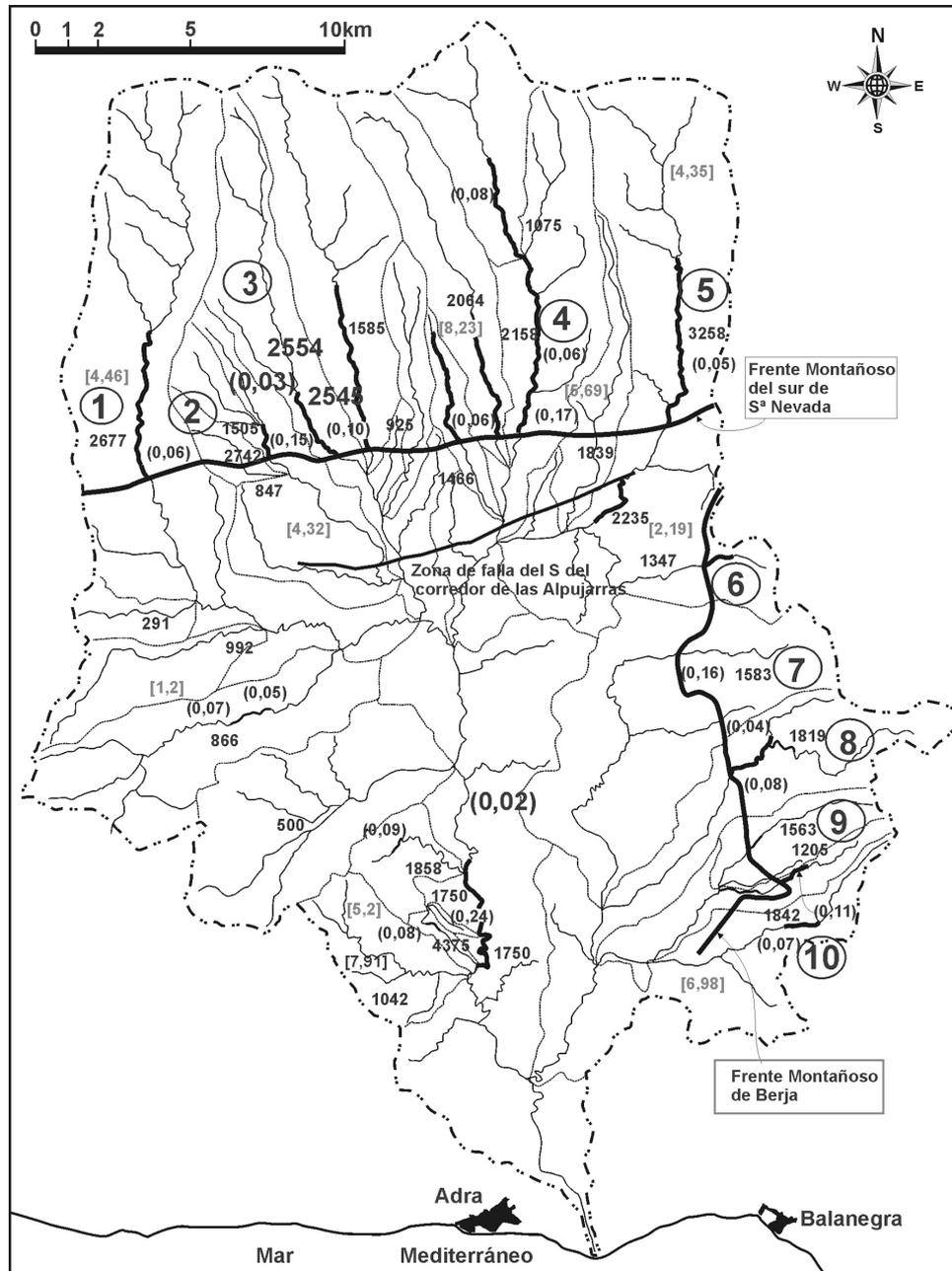


Figura 3. Localización de los frentes montañosos distinguidos, valores más destacados del índice del gradiente del perfil longitudinal de los ríos, sectores más encajados de los mismos (cauces marcados más gruesos) y formas de las cuencas de los afluentes del río Adra. Los índices de SL corresponden a los números solos. Los valores de los índices de encajamiento, E, están entre corchetes, los de la forma de la cuenca (Fc) entre paréntesis y los valores correspondientes al río principal se indican con mayor tamaño. En círculos se marcan los ríos cuyos perfiles longitudinales se muestran en las figuras 4 y 5.

Figure 3.- Situation of the mountain-fronts distinguished, more important values in the stream length-gradient indices (SL) of the rivers, more incised sectors (marked with thicker lines) and form of the basin of the tributaries of the river Adra. The indices of SL correspond to the numbers alone. The values of the indices of incision, E, are between clasps, those corresponding to the form of the basin (Fc) are between parentheses and the values of the main river are indicated with a bigger size. The circled numbers indicate the rivers which longitudinal profiles are showed in figures 4 and 5.

tacto. Los valores elevados que se dan en este último sector dependen de las diferentes litologías que atraviesa el río y de los escalones producidos por las fallas, coincidiendo en no pocos casos el cambio litológico con la posición de sus planos. También se producen realces de esos gradientes sobre los sedimentos neógenos del perfil 5 debido al contraste litológico existente a ambos lados de una falla de desgarre E-O.

El sector occidental de Gádor está cruzado por barrancos que presentan índices con valores no superiores a 2.000 (los más importantes son: 1.842, 1.819, 1.583 y 1.563). La mayoría de estos barrancos descienden hacia el oeste y SO; en uno de ellos su último tramo va hacia el NE y al desembocar en el río Alcolea su perfil del índice del gradiente se eleva hasta el valor de 2.235. En realidad está ligado al encajamiento del río Alcolea, ya rebasado netamente el frente de Berja, en materiales neógenos separados por una falla E-O de mármoles alpujarrides (Fig. 3 y perfil 6 de la Fig. 6).

Estos valores altos del gradiente en el frente de Berja coinciden con dos situaciones tectónicas y litológicas diferentes: el cabalgamiento de unidades alpujarrides (Murtas sobre Gádor) con esquistos y filitas sobre mármoles en algunos casos (perfiles 7, algo del 8 y el 9 de la Fig. 6) y las fallas normales muchas de ellas activas tal como se deduce

de sus escarpes recientes formados en mármoles y los piedemontes afectados (perfiles 7, 8, 9 y 10 de la Fig. 6). En el perfil 6 (Fig. 6) se presenta una elevación del índice del gradiente (con valor de 1347, Fig. 3) en los mármoles calizos de la unidad de Murtas sin que se observe una clara fractura, aunque coincide con la prolongación hacia el norte del frente montañoso.

Además de los datos ligados a los dos frentes anteriores hay que destacar los altos valores que dan los afluentes en su desembocadura en el río Adra o Grande, al sur del embalse de Benínar; el más significativo es el de 4.375, el mayor con diferencia, de toda la cuenca (Fig. 3). Se produce porque el río Adra corta allí a un anticlinal constituido por mármoles de una unidad alpujarride inferior; la fuerte erosión ha dejado colgados una serie de barrancos que recogen aguas desde el Cerrajón de Murtas y corren hacia el E. Estos barrancos, prácticamente perpendiculares al río principal tienen cuencas muy pequeñas, por tanto con capacidad de erosión limitada, por lo que la combinación entre el encajamiento del río principal y esa limitada capacidad de erosión ha provocado que los índices longitudinales de éstos sean muy altos. Otros valores altos que se presentan por esta razón son: 1.858 y 1.750 (Fig. 3).

c.- Índice de encajamiento del río

Según nuestro estudio, los valores más bajos de la cuenca los presenta en general el río principal, manifestados en dos cortes transversales; uno de ellos pasa por el Cerrajón de Murtas y continúa en las proximidades de la cerrada del embalse de Benínar presenta un valor de 0,02. El segundo se ha realizado a 1 kilómetro, aguas arriba, del frente montañoso de Sierra Nevada, con un valor de 0,03, junto a la localidad de Válor, en el río del mismo nombre (Figs. 2 y 3). En este frente tenemos otros valores también bajos, entre los que destacamos los siguientes: 0,05 (sobre el río Paterna, junto al pueblo del mismo nombre; perfil 5 de la Fig. 5), 0,06 (en el río de Mecina, también cerca de la localidad que le da nombre al río, sobre el río Bayárcal y sobre el río Laroles, junto al pueblo; perfil 1 de la Fig. 5), 0,08 (a más de 5 kilómetros, aguas arriba, del frente montañoso; perfil 4 de la Fig. 5), y 0,10 (en el río Nechite, al sur de esta localidad; Figs. 2 y 3).

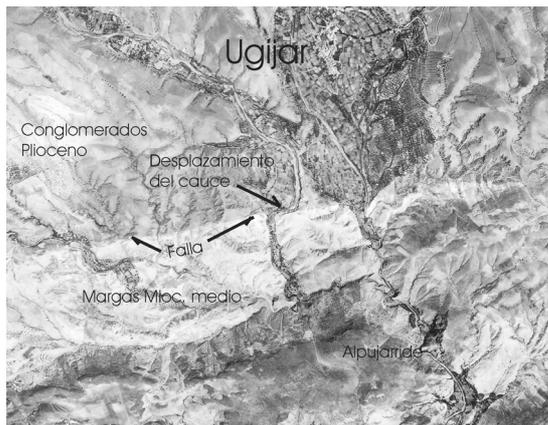


Figura 4. Vista parcial de las fallas del borde sur del corredor de las Alpujarras en el sector de Ugijar donde se ve claramente un cauce desplazado

Figure 4. Detail of the faults of the south border of the Alpujarran Corridor in the Ugijar sector. It is possible to see there the displacement of a riverbed.

En total se ha obtenido el valor de este índice Vf en los 13 barrancos que cortan al frente montañoso del sur de Sierra Nevada (Fig. 7). La media aritmética de los distintos valores de Vf es de 0,14, con una desviación estándar de 0,09.

En el frente de Berja tenemos el tercer valor más bajo de la relación anchura/altura del valle de entre los medidos en toda la cuenca: 0,04. Otros valores bajos calculados en este frente del borde occidental de Gádor son: 0,07 y 0,11 (Fig. 7). La media aritmética de los distintos valores de Vf es de 0,16, con una desviación estándar de 0,1.

También se reflejan los fuertes encajamientos de algunos de los barrancos afluentes del río principal pasado el embalse de Benínar, y sobre los afluentes derechos del río Yátor, al norte del Cerrajón de Murtas. Así se tiene un valor de 0,05 al N del Cerrajón y otros de 0,07.

d.- Índice de la forma de la cuenca

El valor más elevado se presenta en una de las ramblas que cruza el frente montañoso de Sierra Nevada, calculado en 8,23. Otros valores destaca-

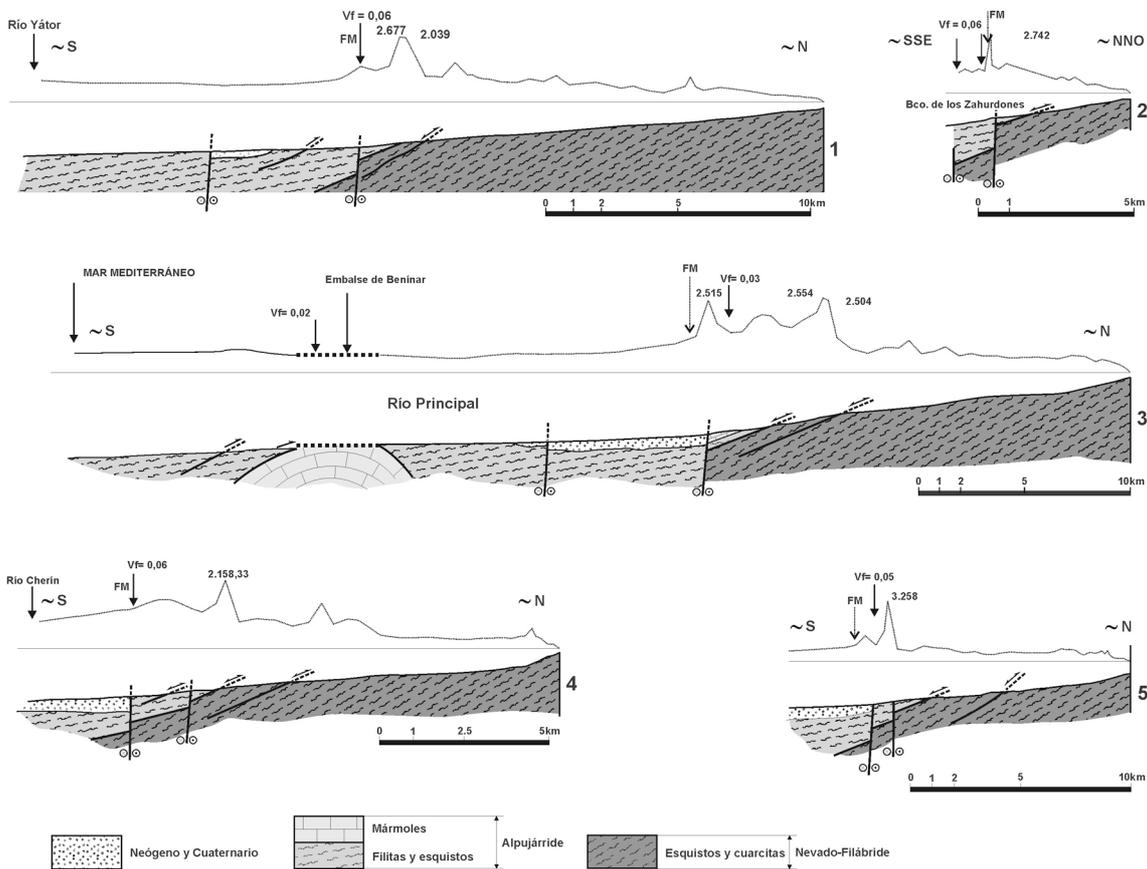


Figura 5. Perfiles de algunos ríos que cruzan el frente montañoso del sur de Sierra Nevada en los que el índice del gradiente del perfil longitudinal es mayor. Se muestra su relación con el frente montañoso (F.M.). A puntos se muestra el índice del gradiente longitudinal. La posición de los ríos se marca en la figura 3. En los perfiles se incluyen datos sobre la geología pero téngase en cuenta que no corresponden a una línea recta como en los cortes habituales, sino a un curso de río cuya dirección cambia.

Figure 5. Profiles of several rivers crossing the mountain-front of the south of Sierra Nevada and presenting the greater values of the gradient profile (SL). Their relation with this mountain-front (F.M.) is indicated. Dotted line indicates the longitudinal gradient. The position of these rivers is marked in Fig. 3. In these profiles some geologic data are included but observe that they do not correspond to a straight line as in the usual cross-sections but to a river course which strike change.

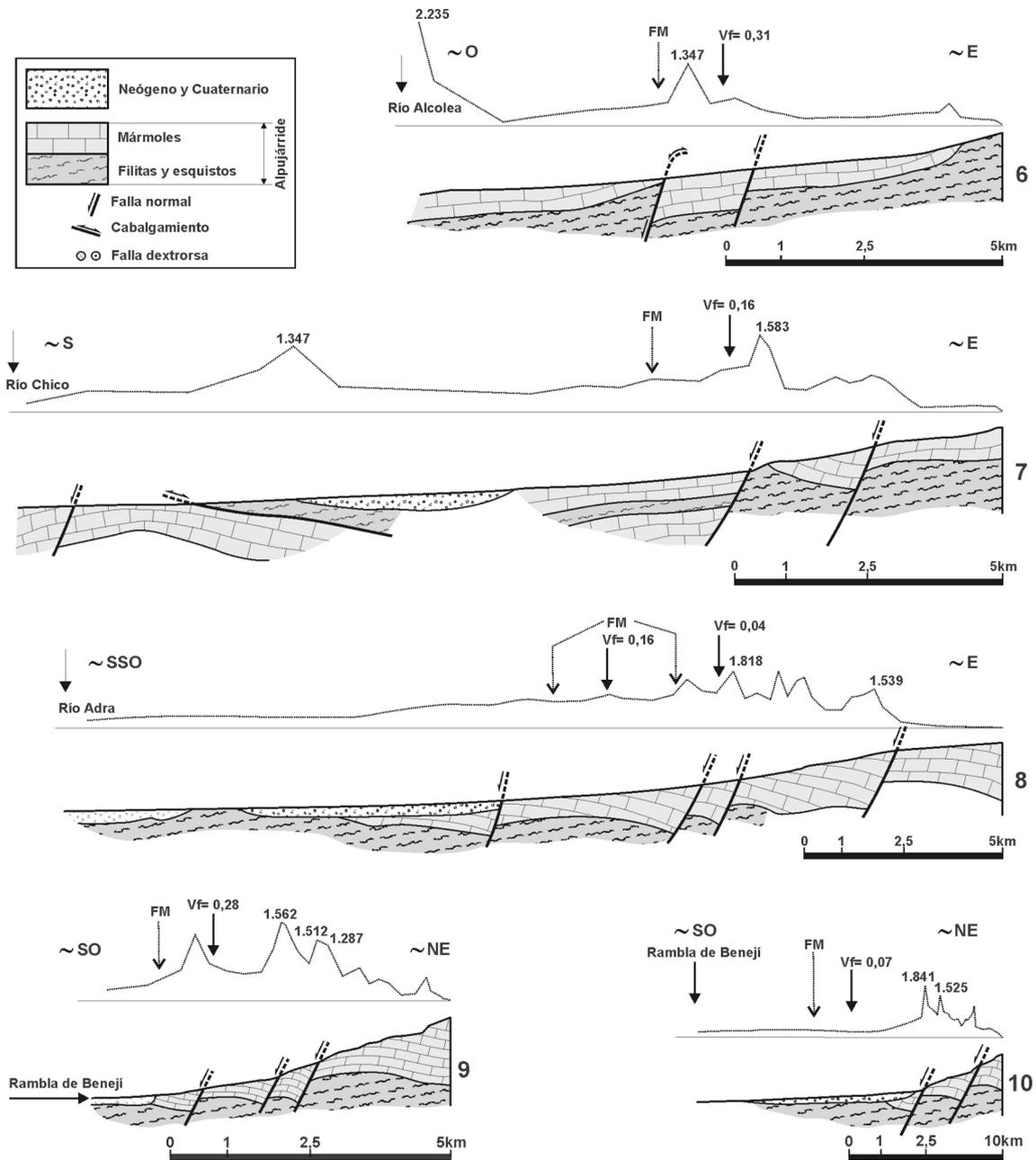


Figura 6. Perfiles de algunos ríos que cruzan el frente montañoso de Berja en el que los que índice del gradiente del perfil longitudinal es mayor. Se muestra su relación con el frente montañoso (F.M.). A puntos se muestra el índice del gradiente longitudinal. La posición de los ríos se marca en la figura 3. En los perfiles se incluyen datos sobre la geología pero téngase en cuenta que no corresponden a una línea recta como en los cortes habituales, sino a un curso de río cuya dirección cambia.

Figure 6. Profiles of several rivers crossing the mountain-front of Berja and presenting the greater values of the gradient profile (SL). Their relation with this mountain-front (F.M.) is indicated. Dotted line indicates the longitudinal gradient. The position of these rivers is marked in Fig. 3. In these profiles some geologic data are included but observe that they do not correspond to a straight line as in the usual cross-sections but to a river course which strike change.

bles de este frente son: 5,69, 4,46 (río Yátor), 4,35 (río de Alcolea) y 4,32 (Fig. 3).

Entre los barrancos que cruzan el frente de Berja hay uno con valor de 6,98. Aparte de éste, los demás no superan el valor de 2,50.

En cuanto a los afluentes del río principal pasado el embalse de Benínar, entre los más destacados, tenemos los valores de 7,91 y de 5,2.

Además de los anteriores sectores, conviene señalar que en el borde sur del corredor de las Alpujarras, desde el río Ugíjar hacia el este, hay varios barrancos que desvían su curso hacia el SO. Este desvío sigue una línea coincidente con fallas (Figs. 2 y 3), que va desde Alcolea hacia el sur de Cherín y Ugíjar. Esta línea se prolonga el oeste, provocando en este caso el desvío de otros barrancos. Estos rasgos van acompañados en numerosos puntos por un neto contraste morfológico y por variaciones en varios de los índices geomorfológicos usados.

e.- Relación entre los índices S_{mf} y V_f y V_f y B_s

Con el fin de evaluar el grado de actividad tectónica, Bull y McFadden (1977) compararon los índices S_{mf} y V_f y clasificaron los frentes montañosos en tres grados de actividad. Los frentes activos (Clase 1) tienen valores de S_{mf} inferiores a 1,6 y los de V_f inferiores a 0,5. Los frentes de moderada actividad (Clase 2) tienen valores de S_{mf} cercanos o algo superiores a 2 y los de V_f pueden ser de hasta 1,4. Diversos autores (Rockwell et al., 1984; Silva et al., 2003) aceptan que para la Clase 1 el levantamiento tectónico esperable es superior a 0,5 m/ka y para la Clase 2 está comprendido entre 0,5 y 0,05 m/ka. La Clase 3 corresponde a frentes tectónicamente inactivos con valores altos de dichos índices y su levantamiento tectónico es inferior a 0,05 m/Ka. En su conjunto, con esta clasificación se obtiene una información semi-cuantitativa del grado relativo de la actividad tectónica de los frentes.

Según dicha clasificación, el frente sur de Sierra Nevada se sitúa claramente dentro de los de Clase 1, dado que su valor de S_{mf} es de 1,44 y los de V_f de los barrancos que lo cruzan no superan la mayoría el valor de 0,10, teniendo algunos de ellos un valor de 0,03 (véanse estos valores de V_f en la figura 7).

Por su parte, el valor del frente montañoso de Berja ($S_{mf} = 1,65$) y los de V_f ligados (oscilan entre

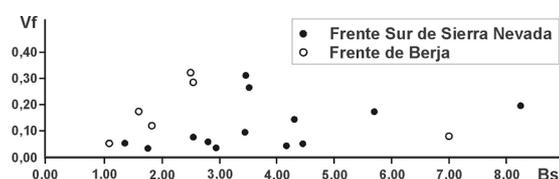


Figura 7. Relación entre los valores de los índices V_f y B_s en los frentes montañosos del sur de Sierra Nevada (FSN) y de Berja (FB). Se han estudiado 13 barrancos que cruzan el frente de Sierra Nevada (mostrados por un punto) y 6 que lo hacen al frente de Berja (mostrados por un círculo hueco). En estos frentes los valores de los índices son: FSN: $S_{mf} = 1,44$, $V_f = 0,14$ (media aritmética) y $0,09$ (desviación estándar) y $B_s = 3,73$ y $1,73$. FB: $S_{mf} = 1,65$, $V_f = 0,16$ y $0,1$ y $B_s = 2,72$ y $1,97$.

Figure 7. Relations between the indexes V_f and B_s in the mountain-fronts of the South of Sierra Nevada (FSN) and Berja (FB). 13 riverbanks crossing the front of Sierra Nevada (indicated by a point) and 6 crossing the front of Berja have been studied (indicated by a circle). In these mountain-fronts the values of the indexes are: FSN: $S_{mf} = 1.44$, $V_f = 0.14$ (arithmetic mean) and 0.09 (standard deviation) and $B_s = 3.73$ and 1.73 . FB: $S_{mf} = 1.65$, $V_f = 0.16$ and 0.1 and $B_s = 2.72$ and 1.97 .

0,07 y 0,11) hacen que quede situado muy próximo a la clase 1, ligeramente menos activo que el anterior frente.

La relación entre V_f y B_s se muestra en el diagrama de la Fig. 7. En ese diagrama se observa que, en su conjunto, los 13 barrancos que cruzan el frente del sur de Sierra Nevada combinan valores de V_f menores que los de los 6 barrancos del frente de Berja con valores mayores de B_s que los de este último frente. Esto conduce también a la conclusión de que los barrancos que cruzan el frente de Sierra Nevada se están encajando más enérgicamente que los del frente de Berja, lo que es también congruente con la mayor actividad tectónica deducida de la comparación de los índices S_{mf} y V_f .

Discusión de los resultados

De la aplicación de los índices geomorfológicos a la cuenca del río Adra resulta lo siguiente:

a.- El frente de Sierra Nevada con un valor del índice S_{mf} de 1,44, con bastantes tramos rectos, lo que indica actividad reciente, se acompaña además con índices longitudinales altos que responden a netos saltos en el perfil topográfico de los barran-

cos representados, coincidentes además con zonas cercanas al frente (Figs. 3 y 5). A esto se suma que las formas de las cuencas situadas al norte son alargadas y estrechas, y sus encajamientos son de cierta relevancia. Por tanto en este frente se deduce que el levantamiento es importante, que continúa en la actualidad. Es un frente netamente activo.

Se observa además que los barrancos que desembocan en el río principal incrementan sus índices longitudinales en mayor o menor grado al llegar a su confluencia y en general, salvo el sector del sur de Benínar, tanto más cuanto más al norte de la cuenca se esté. Este dato confirma a la vez que: a) el principal se está actualmente encajando; b) el sector situado hacia la cabecera se levanta relativamente más con respecto a su nivel de base, con el consiguiente incremento de erosión. Este levantamiento es por tanto más marcado en Sierra Nevada, y se deja notar especialmente en las proximidades del referido frente. En el campo se observa que fallas E-O prácticamente coinciden con la posición del frente, al que controlan

b.- Las fallas del sur del corredor de las Alpujarras, sin formar un verdadero frente, controlan también la dirección local de los ríos y marcan cambios en los valores de los índices, especialmente en los longitudinales. En esta línea se observan algunos valores altos de índices longitudinales, en particular en el río Alcolea, donde se detecta un índice de 3.258. A la vez los ríos cambian su dirección localmente para pasar a ser E-O (Figs. 2 y 4). La acción conjunta de fallas E-O y la litología de los materiales neógenos, más fácilmente erosionables, determina que los sectores deprimidos se sitúen generalmente al norte de estas fallas.

c.- El frente de Berja, en el borde occidental de la Sierra de Gádor es más sinuoso que el del sur de Sierra Nevada, lo que indica menor actividad neotectónica; tiene índices longitudinales de relativa importancia también cercanos al frente montañoso y de ellos se deducen actividad reciente. Esto concuerda en general con los datos de Martínez Díaz (2000b) quien ya señaló la actividad reciente de algunas de las fallas de este borde de Sierra de Gádor. Coinciden en muchos casos estos valores mayores con la presencia de fallas NO-SE de ese borde, algunas de las cuales cortan a los derrumbios de ladera actuales o subactuales. En conjunto, se está produciendo un levantamiento de la sierra de

Gádor, según lo refleja la presencia de fallas normales en este frente de Berja.

Si comparamos el frente de Sierra Nevada con el de Berja, se observa que el primero presenta mayores valores, pero en ambos se reflejan movimientos verticales recientes debido a un levantamiento de las cabeceras de sus ríos, una intensa erosión aguas arriba de los mismos frentes y perfiles transversales con formas de "V". Este levantamiento continúa actualmente tal como lo muestran prácticamente todos los cursos fluviales, encajados varios metros dentro de sus propios cauces. Esto es más notable en Sierra Nevada.

d.- La influencia de la litología se deja ver en el valor de algunos índices longitudinales, tal como se ha señalado previamente (véase por ejemplo los perfiles 1, 3 y 4 de la Fig. 4 donde esto es muy notorio). En algunos casos, son los contactos tectónicos entre unidades y las fallas los que influyen poniendo juntas litologías diferentes lo que, junto al propio desplazamiento de las fallas, conduce a la creación de fuertes pendientes que, consecuentemente, dan valores altos del índice longitudinal.

También la litología debe influir a la hora de comparar los valores de los distintos índices ligados a los dos frentes montañosos. Los barrancos del frente del sur de Sierra Nevada cortan mayoritariamente a esquistos y cuarcitas, mientras que los de Berja lo hacen a mármoles. Sin duda, para que una comparación se hiciera con una fiabilidad total, debería poderse hacer con frentes de litologías similares, lo que claramente no es el caso. Aún así, pensamos que, en su conjunto, las estimaciones obtenidas reflejan la diferente actividad tectónica de los dos frentes estudiados.

e.- En el sector del sur del embalse de Benínar el río se ha encajado cortando a una estructura anticlinal previa (véase la Fig. 2, al sur de Benínar y Turón). Es un proceso de antecendencia que dio por resultado un neto encajamiento (no es el único en la región pues más al oeste de Motril, en el sector llamado Escalate -Fig. 1-, de la carretera de Granada a la costa, el río Guadalfeo corta igualmente a una estructura anticlinal). Los bordes de ese barranco se mantienen prácticamente verticales pues los valles laterales que en ellos desembocan son muy pequeños, con una capacidad erosiva igualmente pequeña lo que da índices enormes a sus afluentes. Por tanto, estos índices no son debi-

dos a la presencia de ningún frente activo en el área, sino a la excesiva erosión del río principal sobre las calizas y dolomías del Manto de Lújar.

f.- El análisis de los índices geomorfológicos muestra un rasgo que conviene señalar finalmente: es el hecho de que prácticamente todos los cursos fluviales actuales, muy en particular los de Sierra Nevada se encuentran sobre-encajados. Es decir, dentro del valle fluvial es absolutamente corriente que el cauce del río, a veces tan solo arroyos estacionales, se encuentre encajado varios metros dando netas hombreras. Es este un hecho que muestra bien a las claras que el proceso de levantamiento prosigue con fuerza en la actualidad. Sin embargo, conforme el río Adra se acerca al mar este nuevo encajamiento en el fondo del valle es en general menos patente y, además, lo que allí se observa puede estar ligado al descenso eustático producido en la última etapa glacial.

En conjunto, los resultados muestran el enorme levantamiento que aún está sufriendo Sierra Nevada en relación con el resto de la cuenca sin que por ello sea pequeño el que se aprecia en la Sierra de Gádor. Este levantamiento está en buena parte facilitado por las fallas descritas, en particular las E-O que se muestran de gran importancia. Martínez-Díaz (2000b) señala su posible papel como fallas de transferencia de la extensión regional ENE-OSO, producida por las fallas NNO-SSE. En el reciente trabajo de Martínez-Martínez et al. (2006) se calculan numerosos mecanismos focales ligados a estas fallas E-O, muchos de ellos de desgarre, algunos de falla normal. Es interesante que muchos de estos terremotos tienen hipocentros situados a profundidades superiores a 10 km, lo que claramente indica que estas fallas, que sobre el terreno alcanzan más de 100 km de longitud, rebasando grandemente al E y al O la cuenca de Adra, llegan a cortar a la corteza prácticamente entera. Probablemente no es aplicable esto a las fallas NNO-SSE, que deben ligarse a niveles de despegue menos profundos. El conjunto de estas fallas facilitan los levantamientos diferenciales, en particular el de Sierra Nevada y en menor proporción el de Gádor. Todos estos levantamientos diferenciales hay que inscribirlos en el levantamiento regional que afecta a la Cordillera desde el Mioceno superior (Sanz de Galdeano y Alfaro, 2004).

5. Conclusiones

En la aplicación de los índices geomorfológicos se ha mostrado que la litología y la estructura previa tienen notoria influencia en los distintos valores obtenidos de los índices. Pero a estos factores se le superponen netamente las deformaciones recientes producidas por la tectónica ligada sobre todo a fallas y al levantamiento regional. Por eso se tiene que:

-Los índices geomorfológicos obtenidos indican que el frente sur de Sierra Nevada es netamente activo, más que el de Berja. Hay barrancos en el frente de Sierra Nevada que presentan índices longitudinales muy elevados. Las subcuencas son más alargadas en Sierra Nevada que en Sierra de Gádor; lo que es indicio de que los barrancos son más activos, en concordancia con un mayor levantamiento. Aún así, los valores obtenidos en el borde occidental de la Sierra de Gádor indican también procesos activos.

-En el sector de Benínar-Turón la causa de los altos índices longitudinales está relacionada con la erosión del río principal en las calizas y dolomías del manto de Lújar que allí cortan a un anticlinal. Es un fenómeno de antecendencia. La poca capacidad erosiva de los valles laterales que allí desembocan determinan que éstos tengan allí unos valores muy altos del V_f .

-Los valores mostrados por los índices geomorfológicos concuerdan con los rasgos geológicos que se muestran activos, en particular las fallas del corredor de las Alpujarras, muy especialmente a lo largo del frente del sur de Sierra Nevada. En el borde sur del corredor otras fallas E-O, paralelas a las anteriores, también controlan la morfología, afectando en particular a la dirección de los cursos de los ríos.

-En conjunto, la red fluvial y los frentes montañosos existentes responden en buena medida a la tectónica reciente del área, reflejada por movimientos de fallas, patentes especialmente en algunos puntos donde se observan sedimentos del Mioceno superior al Cuaternario afectados por los desplazamientos y también reflejada por el levantamiento regional, más marcado en Sierra Nevada y progresivamente decreciente hacia el mar. Las fallas E-O, en el frente sur de Sierra Nevada y en el sur del corredor de las Alpujarras, son las más acti-

vas y después las NNO-SSE del frente de Berja. La combinación de datos geomorfológicos, geológicos y sismológicos muestra que las largas fallas E-O son activas y al alcanzar niveles profundos de la corteza, facilitan en particular el mayor levantamiento de Sierra Nevada.

Agradecimientos: A la Empresa SACYR, cuya política de Empresa posibilita el interés suficiente por la Geodinámica Interna y la Geomorfología actual. Este estudio ha sido financiado en parte por los proyectos CGL2007-60535 y TOPO-IBERIA CONSOLIDER-INGENIO, CSD2006-00041 del MEC, proyecto 83/2007 del MMA y el grupo RNM 217 de la Junta de Andalucía. A. Caballero (IACT) ha dibujado las figuras.

Referencias

- Azañón, J.M.; Azor, A.; Pérez-Peña, V.; Booth-Rea, G.; Rodríguez-Fernández, J.; Delgado, J.; Carrillo, J.M. & Torcal, F. (2004). Morfometría de la red de drenaje, tectónica activa y sismicidad instrumental en el borde occidental de Sierra Nevada (Cordilleras Béticas). *Geo-Temas*, 6 (3), 135-138.
- Bull, W.B. (1977). Geomorphic tectonic activity classes of south front of the San Gabriel Mountains, California. *U.S. Geol. Surv. Contract Report 14-08-001-G-394*, 59 p.
- Bull, W.B. (1978). Geomorphic tectonic classes of the south front of the San Gabriel Mountains, California. *U.S. Geological Survey Contract Report*, 14-08-001-G-394. Office of Earthquakes, Volcanoes and Engineering, Menlo Park, Calif. 59 pp.
- Bull, W.B. & McFadden, L.D. (1977). *Tectonic geomorphology north and south of the Garlock fault, California*. In D.O. Doehring (ed). *Geomorphology in Arid Regions*. Proceeding of the Eighth Annual Geomorphology Symposium. State University of New York at Binghamton, 115-138.
- Canon, P.J. (1976). Generation of explicit parameters for a quantitative geomorphic study of the Mill Creek drainage basin. *Oklahoma Geology Notes*, 36, 1, 3-16.
- Carvajal, R. & Sanz de Galdeano, C. (2001). *La red de drenaje del borde nororiental de la cuenca de Granada, del río Bermejo al Darro. Aplicación de índices geomorfológicos*. En: La Cuenca de Granada. (Sanz de Galdeano, Peláez Montilla y López-Garrido Eds.) Proyecto PB97-1267-C03, 67-77.
- El Hamdouni, R. (2001). *Estudio de movimiento de ladera en la cuenca del río Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes*. Tesis Univ. Granada. 430 pp.
- García Tortosa, F.J. & Sanz de Galdeano, C. (2007). Evidencias geomorfológicas de actividad tectónica cuaternaria en el frente montañoso del borde sur de Sierra Nevada: la falla normal de Laujar de Andarax. *Cuaternario y Geomorfología*, 21, 101-112.
- Groupe de Recherche Néotectonique de l'Arc de Gibraltar (Armijo, R., Benkheilil, J., Bousquet, J.C., Estévez, A., Guiraud, R., Montenat, C., Pavillon, M.J., Philip, H., Sanz de Galdeano, C. & Viguier, C.). (1977). L'histoire tectonique récente (Tortonien à Quaternaire) de l'Arc de Gibraltar et des bordures de la mer d'Alboran. *Bull. Soc. géol. France, Paris*, (7), XIX, 3, 575-614.
- Hack, J.T. (1973). Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal Research U.S. Geol. Survey*, 1,4, 421-429.
- Keller, E.A. & Pinter, N. (1996). *Active Tectonics (Earthquakes, Uplift and Landscape)*. Prentice-Hall Inc. New Jersey, 338 pp.
- Martínez-Díaz, J.J. (2000a). Indicios geomorfológicos indicativos de tectónica activa en el sector Lorca-Totana de la falla de Alhama de Murcia. *Bol. Geol. Min.*, 111-1, 67-76.
- Martínez Díaz, J.J. (2000b). Análisis sismotectónico de la serie sísmica de Adra: mecanismos de terremotos compuestos como respuesta a la interacción entre fallas activas en el sureste de la Cordillera Bética. *Rev. Soc. Geol. España*, 13, 1, 31-44.
- Martínez Martínez, J.M. (2006). Lateral interaction between metamorphic core complex and less-extended, tilt block domains: the Alpujarras strike-slip transfer fault zone (Betics, SE Spain). *Journal of Structural Geology*, 28, 602-620.
- Martínez-Martínez, J.M.; Booth-Rea, G.; Azañón, J.M. & Torcal, F. (2006). Active transfer fault zone linking a segmented extensional system (Betics, southern Spain): Insight into heterogeneous extension driven by edge delamination. *Tectonophysics*, 422, 159-173.
- Ramírez-Herrera, M.T. (1998). Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay Graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23,317-332.
- Rockwell, T.K., Keller, E.A. & Johnson, D.L. (1984). *Tectonic geomorphology of alluvial fans and mountain fronts near Ventura, California*. En: Morisava, M. y Hack, T.J. (Eds.). *Tectonic Geomorphology*. Publ. in Geomorphology, State University of New York at Binghamton, 183-204.
- Sanz de Galdeano, C. & Alfaro P. (2004). Tectonic significance of the present relief of the Betic Cordillera. *Geomorphology*, 63, 178-190.
- Sanz de Galdeano, C.; Rodríguez-Fernández, J. & López-Garrido, A. C. (1985). A strike-slip fault corridor within the Alpujarra Mountains (Betic Cordilleras, Spain). *Geol. Rundschau*, 74, 642-655.
- Silva, P.G. (1994). *Evolución geodinámica de la depresión del Guadalentín desde el Mioceno superior hasta la actualidad: Neotectónica y Geomorfología*. Tesis Univ. Complutense. Madrid, 642p.
- Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C. & Bardají, T. (2003). Fault-generated mountain fronts in southeast Spain: geomorphologic assessment of tectonic and seismic activity. *Geomorphology*, 50, 203-225.