

# Aplicación de índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente en el antepaís Bético

## *Application of geomorphic indices of recent active tectonics in the Betic foreland*

P. J. Rincón y R. Vegas

Dpto. de Geodinámica, Fac. de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense; 28.040, Madrid.  
e-mail: Ruidera@eucmax.sim.ucm.es

### ABSTRACT

*The application of some geomorphic indices of recent active tectonics in the Meseta Inferior of the Iberian Peninsula has proportioned some interesting insights about of the interdependence between the neotectonic deformation and its geomorphic expression. The maps obtained are coherent with the activation of NNE-SSW, ENE-WSW and NW-SE oriented lines of fracture.*

**Key words:** geomorphic indices, neotectonics, active tectonics, Betic foreland

*Geogaceta*, 27 (1999), 139-142  
ISSN: 0213683X

### Introducción

La necesidad de contrastar las conclusiones logradas a partir de la realización de un análisis estructural (fallas, diaclasas, pliegues y sismicidad) sobre un sector del *Antepaís Bético* ha propiciado el uso de técnicas diversas de análisis geomorfológico o morfométrico. Entendemos por *Antepaís Bético* al área de plataforma del orógeno *bético-rifense* en la Península Ibérica. Así, en este trabajo consideramos buena parte de la Meseta Inferior (Fig. 1). Una de estas contrastaciones ha consistido en el uso de *índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente*. Dado que se pretendía definir un entorno geodinámico para esta área de plataforma ibérica válido durante el periodo neotectónico, asumimos entonces como axioma fundamental el hecho de que la disposición del relieve actual debía ser una consecuencia directa de la atenuación del tensor de esfuerzos deformacional incidente sobre el antepaís durante tal periodo. Por tanto, su análisis habría de proporcionar información muy útil para este intento de caracterización geodinámica regional. Esta información se puede resumir en la identificación de áreas donde ha sucedido o sucede un basculamiento tectónico, más o menos complejo, de las cuencas de drenaje (uni-

dad de trabajo empleada), coincidiendo su localización con los sectores en los cuales se ha atenuado de manera preferente la deformación originada en el límite litosférico convergente África-Eurasia (para las longitudes geográficas de la Península Ibérica) durante el periodo neotectónico (Mioceno superior-Actualidad; Letouzey y Trémolières, 1980).

### Índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente

Tal y como proponen Keller y Pinter (1996), la cuantificación de la morfología del terreno, *morfometría*, permite comparar distintos entornos para caracterizar, así, áreas de comportamientos particulares o característicos. Estos mismos autores proponen que son los *índices geomorfológicos de actividad tectónica reciente* los más indicados para este propósito. La determinación que se tomó para usar estas técnicas tropezó con un obstáculo importante: la escala de trabajo (escalas 1:500.000 y 1:100.000). Sin embargo, es la contrastación de los resultados conseguidos con otras metodologías geológicas completamente diferentes a ésta la que permite la extrapolación de las conclusiones logradas a escalas mayores.

Estos índices están basados en el análisis morfométrico de la red de drenaje, constituyendo sólo aproximaciones matemáticas a distintos aspectos geomorfológicos relacionados con los procesos erosivos y deposicionales del sistema fluvial (Keller, 1986; Silva, 1994). Tal y como propone este último autor, la validez de estos índices como indicadores de la existencia de actividad neotectónica se basa en su capacidad para detectar las posibles anomalías introducidas en el sistema fluvial por cambios de nivel de base locales inducidos tectónicamente. Dependen, por tanto, de dos factores morfológicos fundamentales: la *red fluvial* y el *relieve* (interpretable en este caso como la morfología de la cuenca o subcuenca de drenaje). Para este trabajo se han escogido tres de los numerosos *índices* propuestos en la bibliografía consultada: Strahler (1952), Hack (1973), Bull (1977), Cox (1994), Keller (1986), y Keller y Pinter (1996). Dos de ellos porque suponían los más adecuados para analizar una extensión tan considerable como la de nuestra zona de estudio; el tercero porque nos permitía detectar y contrastar la existencia de una serie de discontinuidades estructurales básicas para la comprensión del modo de atenuación de la deformación neotectónica en

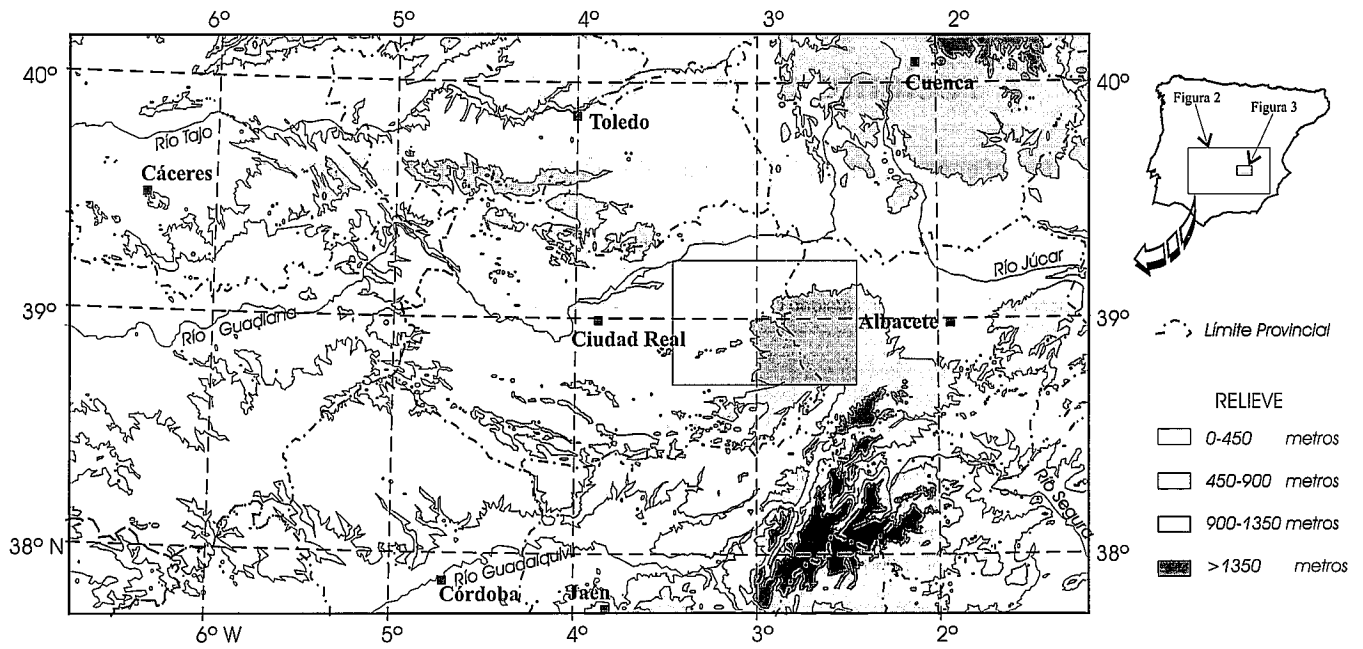


Figura 1: Localización general del área de trabajo y de los dos gráficos siguientes.

Figure 1: Location of the studied area and of the next maps.

el Altiplano del Campo de Montiel y, por ende, en la superficie restante del área de plataforma.

La escala de trabajo, así como los índices escogidos, ha obligado a la definición tanto de un número determinado de cuencas de drenaje como a la elección de un *cauce principal* de la cuenca o "trunk stream" (*sensu* Mayer, 1990). Dada la escala regional del estudio, se ha preferido delinear una síntesis de subcuencas de drenaje sobre un mapa topográfico a escala 1:500.000 basada en las observaciones hechas sobre la topografía a escala 1:200.000 (topografías provinciales). El *cauce principal* ha coincidido en la mayoría de las ocasiones con el curso fluvial principal. Cuando esto no ha sido posible se ha considerado como el "trunk stream" a aquel cauce que tuviera la mayor longitud de toda la cuenca. A continuación se procede a describir brevemente los fundamentos teóricos de los índices utilizados.

**Índice de asimetría de la cuenca ("AF")**

Cuando sobre una cuenca de drenaje incide una deformación tectónica, el patrón o el entramado de cauces que la caracterizan se verá afectado en mayor o menor medida según sea la intensidad de la deformación y la capacidad que posea la cuenca para absorberla: existencia o ausencia de directrices preferentes capaces de acomodar deformación, existencia o ausencia de litologías plásticas capaces

de absorber o amplificar la deformación, etc. El *índice de asimetría de la cuenca* intenta cuantificar este comportamiento, sintetizable en la ausencia o existencia de basculamientos a escala de la cuenca de drenaje, mediante una relación porcentual sencilla entre las áreas ocupadas por las dos márgenes de un río. Así, la fórmula que permite tal relación adimensional es la siguiente:

$$AF_D = \left( \frac{A_D}{A_T} \right) \times 100$$

Donde "AF<sub>D</sub>" es el valor del *índice* (porcentaje) calculado para la margen derecha del río, "A<sub>D</sub>" es el área correspondiente a la margen derecha, y "A<sub>T</sub>" el área total de la cuenca de drenaje. Si se calculase para la margen izquierda "AF<sub>I</sub>" entonces:

$$AF_I = 100 - AF_D$$

Cuanto más se aproxime éste al 50% menor será la influencia de la actividad tectónica; cuanto más se diferencie del 50% mayor influencia tuvo o tiene la incidencia de una actividad deformacional: *mayor intensidad del basculamiento*. Lógicamente, pueden existir condicionantes geológicos diversos (estructuras de plegamiento, litologías con una resistencia a la erosión diferente, etc.) que obliguen a un entramado fluvial determinado que supongan valores de AF alejados del 50% y que no esté para nada relacionado con basculamientos debidos a la incidencia de

una deformación tectónica. En este caso quizás la escala de trabajo empleada suponga una ventaja, ya que tendería a *homogeneizar o regionalizar afecciones geológicas locales* de estas características.

**Factor de simetría topográfica transversal ("T")**

Este nuevo *índice* adimensional es, otra vez, especialmente sensible a los basculamientos generados por la incidencia de una deformación tectónica. Es más preciso que el anterior, ya que considera distintos valores para una misma cuenca, pero muy similar en sus principios. La fórmula que permite su cálculo es la siguiente:

$$T = \frac{D_d}{D_a} - 1 \quad -1000$$

$$T = \frac{D_a}{D_d} - 1 \quad -1000$$

Donde "D<sub>d</sub>" representa la distancia existente entre el límite que supone la divisoria con las cuencas adyacentes y la divisoria dentro de la propia cuenca de drenaje (línea teórica que igualaría el área de las dos márgenes del río principal o "trunk stream"), y "D<sub>a</sub>" define la distancia (medida sobre el segmento rectilíneo anterior) desde la divisoria interna de la cuenca de drenaje hasta el cauce principal que la disecta. Por tanto, para una misma cuenca son posibles tantos puntos como segmentos rectilíneos puedan definirse, de aquí la citada *mayor sensibilidad* de este índice con respecto al valor único obtenido con el *factor de asimetría de la cuenca* anterior. Para

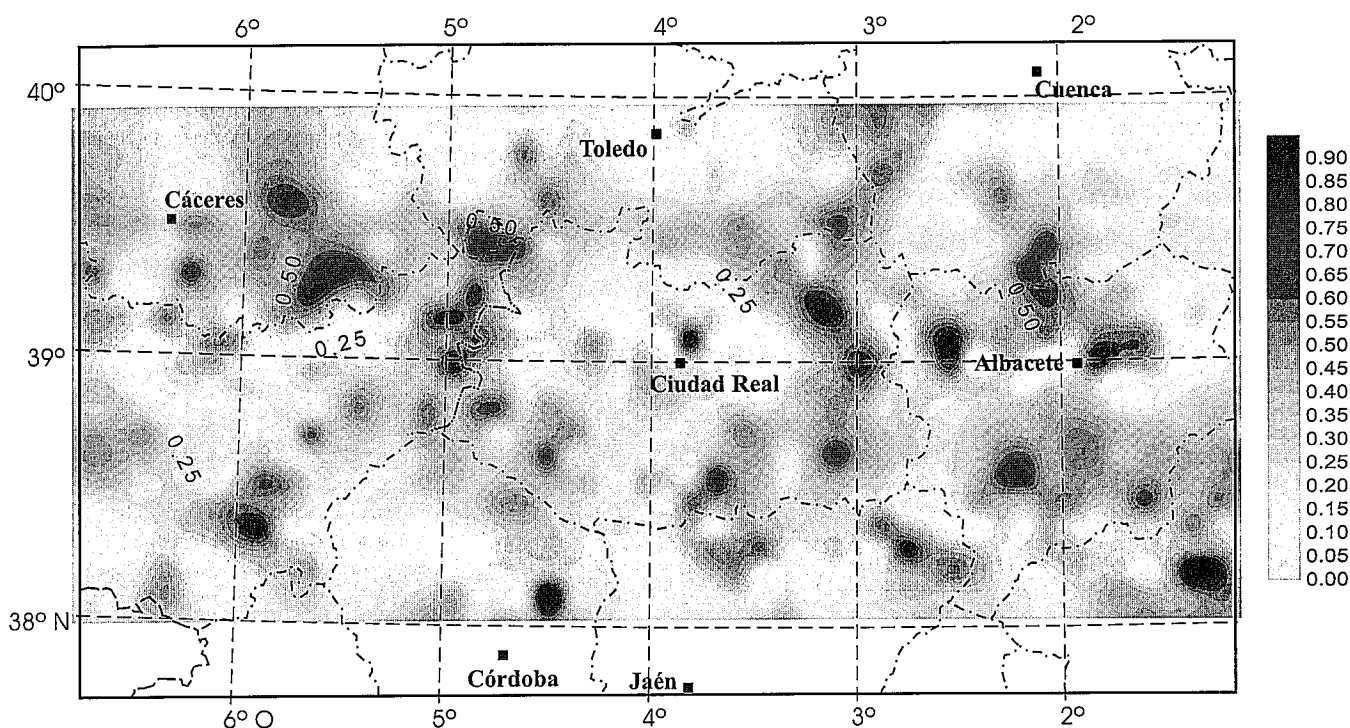


Figura 2: Resultados obtenidos a partir de la aplicación del factor de simetría topográfica transversal en el antepaís (véase explicación en el texto).

Figure 2: Conclusions obtained from the transverse topographic symmetry factor application in the foreland (see text).

una cuenca totalmente simétrica, el valor de  $T$  será igual a cero. Cuanto más se aproxime este valor a la unidad mayor asimetría existirá entre las dos márgenes del cauce principal que disecta la cuenca, pudiendo definirse incluso sentidos de basculamiento locales y preferentes para la cuenca.

#### Índice de longitud-gradiente del cauce ("SL")

Este tercer índice utilizado es aplicable a cualquier cauce fluvial que disecte la cuenca de drenaje, no precisa que se trabaje necesariamente con el "trunk stream". Sin embargo, requiere escalas de trabajo más detalladas que los anteriores, ya que habrán de definirse intersecciones entre el cauce escogido con las curvas de nivel definidas en las síntesis topográficas que se estén utilizando. Tal y como proponen Keller y Pinter (1996), se trata de un índice especialmente sensible a los cambios existentes en la pendiente del canal y que intenta cuantificar la capacidad erosiva de un río. Estos cambios pueden ser consecuencia de variaciones en la resistencia de las rocas a la acción erosiva del agua, o indicativos de la existencia de actividad tectónica, o consecuencia de ambos a la vez. Valores anormalmente altos o anormalmente bajos pueden suponer una de estas tres situaciones, siempre y cuando se considere que la respuesta

ofrecida por el río ante cualquiera de estos tres condicionantes es sumamente rápida. La fórmula empleada relaciona el desnivel provocado por la acción erosiva del río, para un incremento de longitud determinado, considerando el aumento progresivo de la longitud del cauce desde un punto de interés inicial que se escoja. Se resume en la expresión matemática siguiente:

$$SL = \frac{\Delta H}{\Delta L} \times L$$

Donde  $\Delta H$  es la diferencia entre la cota (curva de nivel) superior y la cota (curva de nivel) inferior consideradas,  $\Delta L$  es la longitud medida sobre el mapa existente entre la curva de nivel superior y la curva de nivel inferior consideradas, y  $L$  es la longitud acumulada desde el punto inicial de interés hasta el punto intermedio definible entre la curva de nivel superior y la curva de nivel inferior consideradas.

#### Aplicación real de los índices geomorfológicos

El comienzo de este análisis consistió en la delineación de un mapa de subcuencas de drenaje principales (entendemos por cuencas principales las del Guadiana, Tajo, etc.) a escala 1:500.000 (con sus "cauces principales" correspondientes). Para la delimitación de las

subcuencas se consideró la información proporcionada por las síntesis topográficas provinciales a escala 1:200.000. Una vez delimitadas las cuencas se delinearon sobre las mismas los "trunk streams" correspondientes. A partir de este momento comenzó la aplicación de los índices "AF" y "T". Dado que el tercer índice ("SL") es capaz de proporcionar información a partir de cualquier cauce, se escogió un área de aplicación sobre la base de la síntesis topográfica 1:100.000: el Altiplano del Campo de Montiel. El motivo de la elección fue comprobar la existencia o inexistencia de fracturas NE-SO o ENE-OSO a partir de una red fluvial que disecta al altiplano siguiendo directrices estructurales orientadas preferentemente NO-SE (ortogonales a las anteriores). Una vez obtenidos todos los valores, para los tres índices, estos fueron introducidos en una base de datos que permitiera su tratamiento matemático y la realización posterior de mapas de isovalores para cada uno de los tres índices.

Con la aplicación del factor de asimetría ("AF"), a escala 1:500.000, se consiguió una visión regional de la actividad tectónica más reciente sucedida en las cuencas de drenaje principales. Un análisis del "mapa de actividad" logrado revela una tendencia clara de orientación, en absoluto aleatoria, para aquellas isolíneas no comprendidas dentro del intervalo de porcentajes 45%-55%. Evidentemente, los

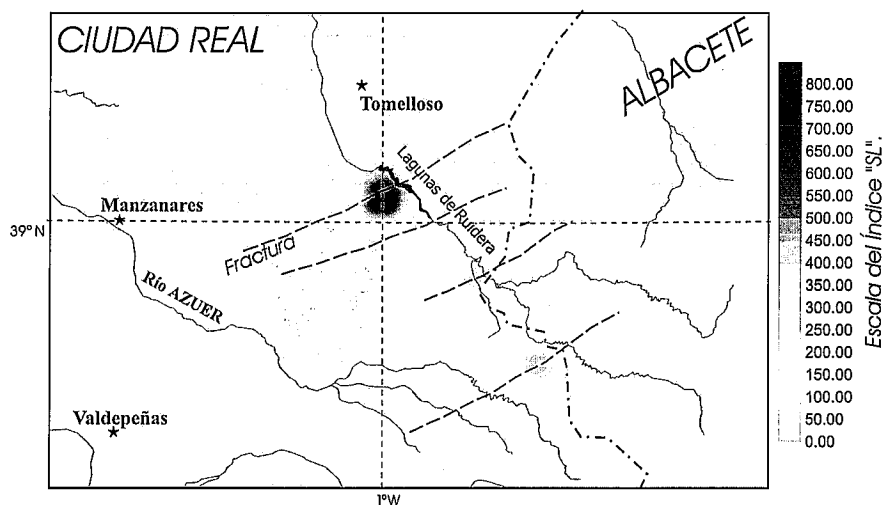


Figura 3: Resultados obtenidos a partir de la aplicación del índice de longitud-gradiente del cauce en el sector NO de la comarca del Campo de Montiel (véase explicación en el texto).

Figure 3: Conclusions obtained from the stream length-gradient index in the NW of the Campo de Montiel district (see text).

puntos de representación utilizados siguen las directrices impuestas por las cuencas de drenaje: si la disposición de las cuencas no es aleatoria tampoco habrá de serlo la de las isolíneas de este mapa.

El uso del índice de simetría topográfica transversal ("T") ha supuesto, quizás, el modo más eficaz para establecer una relación directa entre la geometría de la cuenca de drenaje, la actividad tectónica, y las directrices estructurales preferentes que existen en el Antepaís Bético (Fig. 2). El número de puntos utilizados en la realización del "mapa de actividad" correspondiente ha sido el mismo que para el caso del factor de asimetría de las cuencas. Sin embargo, en este caso cada punto no ha supuesto un único valor por cada cuenca de drenaje sino que cada punto muestra un cálculo individual del índice. De este modo, el resultado ha sido un mapa con más información que el anterior acerca de la geometría de las cuencas, menos esquemático y de mayor precisión. En éste se puede comprobar como la orientación preferente de las isolíneas con valores cada vez más distantes de cero define directrices de ámbito regional.

Al emplear el índice de longitud-gradiente del cauce ("SL") se ha pretendido contrastar la existencia de fracturas orientadas ~NE-SO y/o ENE-OSO en la comarca manchega del Campo de Montiel. Estas fracturas se han detectado mediante la observación de imágenes LANDSAT y mediante la observación directa en campo. Ha sido la presencia de una red fluvial que disecta a esta cobertera carbonatada jurásica según orientaciones preferentemente NO-SE (ortogonales a las fracturas mencionadas) la que también ha propiciado este intento de aplicación. En nuestro propósito de establecer un modelo geodinámico para el Antepaís Bético, el conocimiento de la estructuración

del Altiplano del Campo de Montiel suponía un aspecto crucial (por su localización frente a la estructura prebética del Arco de Alcaraz) para el conocimiento del modo en el cual ha sucedido la atenuación de la deformación neotectónica. El mapa obtenido de este modo revela unos valores máximos muy localizados (Fig. 3). Cuando se superpone a aquel el mapa estructural correspondiente, se comprueba la existencia de una relación directa entre estos valores máximos y las fracturas mencionadas. Así, el mapa obtenido a partir del índice "SL" define una serie de isolíneas con valores distintos de cero, ubicados sobre estructuras orientadas según NE-SO y NO-SE. La acomodación NO-SE es lógica ya que la propia distribución de la red fluvial define esta tendencia. Mediante el uso de este índice parece evidenciarse una actividad tectónica preferente a favor de algunas de estas fracturas NE-SO, en su intersección con otras orientadas NO-SE.

### Conclusiones

La totalidad de los mapas de isovalores logrados a partir de la metodología anterior suponen una novedad en este sector del antepaís en el modo de analizar tanto la disposición espacial preferente de la red fluvial como la geometría de las cuencas de drenaje. El empleo de una metodología basada en una cuantificación de la morfología del terreno nos ha permitido comparar escenarios geológicos individuales (cuencas de drenaje) mediante la consideración de escalas de trabajo poco habituales. En este sentido, cabe decir que la utilización de estas escalas creemos que tiende a asignar un origen estructural (en detrimento de otros posibles: por ejemplo litológico o sedimentológico) a las variaciones o anomalías encontradas en las geometrías de

las cuencas, ya que regionaliza afecciones geológicas locales relacionables con otros aspectos geológicos. Gracias a esta cuantificación ha sido posible obtener una visión regional, inexistente hasta la actualidad, de las áreas donde los índices geomorfológicos revelan una cierta actividad tectónica reciente. Sin embargo, no debiera olvidarse que estos índices están basados en el análisis morfométrico de la red de drenaje, constituyendo sólo aproximaciones matemáticas a distintos aspectos geomorfológicos relacionados con los procesos erosivos y deposicionales del sistema fluvial (Keller, 1986; Silva, 1994).

Esta cuantificación es coincidente con la realizada a partir del análisis estructural (fallas, diaclasado y pliegues) y el análisis de la sismicidad moderada registrada en este sector por el Instituto Geográfico Nacional. Así, por ejemplo, los "corredores" o "bandas" delimitados de manera nítida a partir del índice "T" en el sector oriental (estructura prebética del Arco de Alcaraz y su "frente" en el antepaís) coinciden con las zonas donde los paleoesfuerzos neotectónicos se han resuelto de un modo más intenso durante los últimos 9 Ma (Rincón, 1999). De la misma manera, la localización preferente de los epicentros de los terremotos también es coincidente con las alineaciones logradas con los índices. De este modo, la contrastación deseada para las conclusiones conseguidas del análisis estructural es totalmente satisfactoria, colaborando así en el establecimiento de un entorno geodinámico para el interior peninsular: entorno flexural (Vegas y Rincón, 1996; Rincón, 1999).

### Bibliografía

- Bull, W.B. (1977): *U.S. Geological Survey Contract Report*, 14-08-001-G-394.  
 Cox, R.T. (1994): *Geol. Soc. Am. Bull.*, 106, 571-581.  
 Hack, J.T. (1973): *Jour. Research U.S. Geol. Survey*, 1, 4, 421-429.  
 Keller, E.A. (1986): In: *Active Tectonics*; Geoph. Study Com., Nat. Acad. Press. 136-147.  
 Keller, E.A. Pinter, N. (1996): In: *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift, and Landscape*. Edit. Prentice Hall. 121-147.  
 Letouzey, J. y Trémolières, P. (1980): In: *Rock mechanics*. Suplemento 9. 173-192.  
 Mayer, L. (1990): In: *Introduction to Quantitative Geomorphology*. Prentice-Hall. 101-265.  
 Rincón, P.J. (1999): *Tesis Doctoral*, U.C.M.; 624 pp.  
 Silva, P. (1994): *Tesis Doctoral*, U.C.M.; 642 pp.  
 Strahler, A.N. (1952): *Geol. Soc. Am. Bull.*, 63: 1117-1142.  
 Vegas, R. y Rincón, P.J. (1996): *Geogaceta*, 19, 31-34.