

Morfología de perfiles de ríos en roca. Control tectónico y significado evolutivo en el Bajo Guadiana

Longitudinal profiles in bedrock rivers. Tectonic controls and landscape evolution significance in the Lower Guadiana River

G. Garzón, J.A. Ortega y J. Garrote

Departamento de Geodinámica, Facultad de Geología, Universidad Complutense, Madrid, minigar@geo.ucm.es ; jortega@geo.ucm.es ; julio.garrote@cedex.es

ABSTRACT

Bedrock rivers are increasingly becoming of interest due to their significance in controlling upstream entrenchment by fixing the base level. Longitudinal profiles are dependant not only of discharge but also on incision capability due to bedload transport thresholds determined by gradient availability. The lower Guadiana River incises into the large Extremadura-Alentexo planation surface, developing large canyon carved on extended flat rocky benches with internal channels. Their development cannot be understood as that of simple hydrodynamic features produced and backwards erosion by lithologic control. In order to determine drainage network evolution in relation to regional surfaces and tectonics, longitudinal profiles river profiles from the Guadiana River and its tributaries have been reconstructed and their concavity index and mathematical fitting curves analysed. Different reaches might be interpreted on a morphostructural framework, with convex river profiles adjusting to active base level lowering as compared to the more stable and better evolved upstream rivers. To explain the convexity towards the south, one must consider the subsidence of the Guadalquivir flexure, which coincides roughly with the Guadiana mouth.

Key words: *bedrock rivers, longitudinal profiles, concavity index, tectonic morphology*

Geogaceta, 44 (2008), 63-66
ISSN: 0213683X

Introducción

El reciente impulso en la morfología tectónica y en los modelos de simulación numérica del relieve parte de premisas de simplicidad y homogeneidad de los procesos dinámicos. Uno de los aspectos manejados, el de incisión fluvial y evolución de los perfiles longitudinales de los ríos tropieza con el problema de la diferencia de comportamiento entre los tramos aluviales y los tramos en roca. Los ríos en roca han sido hasta el momento los grandes olvidados de la geomorfología fluvial. Así como el estudio de los sistemas aluviales eclosionó con la sedimentología de los reservorios de hidrocarburos, la incisión de los cañones fluviales no ha despertado mayor expectación hasta la actualidad.

Y, sin embargo, la evolución de los ríos en roca representa una de las claves para entender la configuración actual de las cuencas terciarias y la estructuración del paisaje. Una de las principales connotaciones de los ríos en roca es que definen un nivel de base relativamente estable para el desarrollo de toda la red de drenaje aguas arriba, que no podrá continuar su encajamiento mientras no se produzca la incisión del tramo rocoso. Este hecho repre-

senta un control fundamental para la evolución de las cuencas terciarias, que se verán abocadas a procesos de relleno o vaciado en función de la posibilidad o no de continuar su vaciado.

El estudio de los lechos rocosos se basa en parte en sus perfiles longitudinales y especialmente en la presencia de zonas de inflexión o saltos (*knickpoints*), puesto que es ahí donde realmente se dilucida la capacidad de incisión y de retroceso del perfil. La tendencia del perfil longitudinal a la concavidad fue definida por Gilbert (1877, ref. en Sklar y Dietrich, 2001) considerando que aunque la pendiente era inversamente proporcional al caudal, la carga sólida afectaría a los ríos en roca tanto como abrasivo, como factor limitante por recubrimiento. Por otra parte, White (1946, ref. en Morris y Williams, 1999) expuso que la pendiente de un río maduro es proporcional al tamaño de su carga. En los ríos en roca el grado de retroceso viene determinado por el índice de erosión (Tinkler y Wohl, 1998) y por ello hay que tener en cuenta diversos factores. Considerando que el índice de erosión es proporcional al esfuerzo de cizalla del lecho, o lo que es lo mismo a la «potencia fluvial» (*stream power*) numerosos autores como Howard (1980 y 1998) consideran

que este índice es una función potencial del área (sustitutiva del caudal), del gradiente y de un factor de erosionabilidad del lecho. Pero más recientemente otros autores (Sklar y Dietrich, 1998 y 2001) sostienen que los modelos basados en el caudal, son demasiado simples y la incisión en roca tiene un control básico que es el umbral de transporte de la carga.

El río Guadiana, en su último tramo, esto es al abandonar la cuenca terciaria de Badajoz se encaja profundamente en la penillanura Extremeño-Alentejana desarrollada sobre el basamento varisco, discurre entallado en cañones junto con sus afluentes hasta su desembocadura, a lo largo de más de 200 km (Fig. 1). En su lecho se presentan algunos *knickpoints* significativos como el de la salida de la cuenca de Badajoz y otro de gran magnitud cerca ya de la zona influencia estuarina. Su desarrollo no permite interpretarlos como simples accidentes hidrodinámicos originados por control litológico, si no que ambos saltos de agua se desarrollan sobre extensas plataformas rocosas (Garzón *et al.*, 2005). En el salto inferior (Pulo do Lobo) del orden de 15 m de altura, la plataforma conforma el fondo de valle junto con un canal interno a lo largo de una de gran extensión (Ortega,

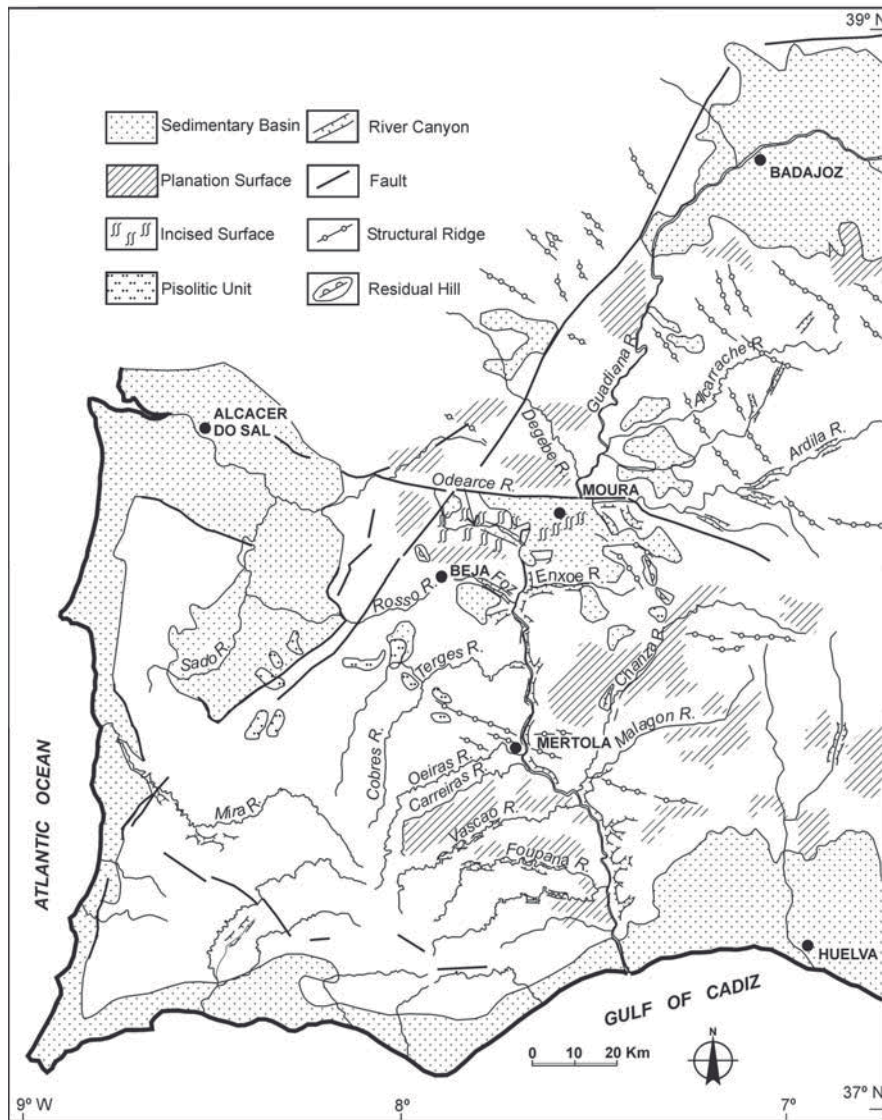


Fig. 1.- Esquema geomorfológico del Bajo Guadiana y sus afluentes.

Fig. 1.- geomorphological setting of the studied area.

2007) y luego queda colgada, pero es difícilmente interpretable como una terraza erosiva debida a cambios de nivel del mar cuaternarios como ha sido propuesta previamente (Feio, 1947). La zona supone pues un área suficientemente representativa para analizar los perfiles de este río junto con sus afluentes, y su adaptación a diferentes funciones matemáticas que permitan interpretar su evolución y significado dentro del contexto geomorfológico.

Metodología

Se han realizado los perfiles longitudinales del Bajo Guadiana y de sus afluentes. Dada la gran extensión de la zona de estudio y la necesidad de una topografía detallada con curvas de nivel de 10m, se han empleado diversos métodos. Los mapas 1:25.000 digitales continuos del IGEO-SIG (Inst. Geog. do Exército)

disponibles en Internet para la zona de Portugal. Los datos en España se han obtenido directamente del modelo digital del terreno (MDT) producido por el consorcio formado por las agencias espaciales de

EE.UU., Italia y Alemania (Proyecto SRTM) procesado por la ETS de Montes (UPM) cuya definición es de 100 metros. Se obtuvieron las curvas de nivel, corregidas para eliminar los errores del MDT así como las incoherencias generadas durante la extracción de las isolíneas de altura. Una vez corregido el modelo vectorial de curvas de nivel, se utilizó el trazado de los cursos fluviales para interpolar el perfil longitudinal. Teniendo en cuenta la alta sinuosidad de los ríos y su profundo encajamiento, la interpolación del relieve ha precisado de una corrección manual importante, disminuyendo la ventaja de ahorro de tiempo y precisión de los SIG.

Sobre estos perfiles se han realizado ajustes para determinar sus líneas de tendencia. Los perfiles pueden ajustarse a varios tipos de funciones matemáticas: Lineal ($y=a-bx$), potencial ($y=ax^b$), exponencial ($y=ae^{bx}$) o logarítmica ($y=\log x$) que pueden asociarse con diferentes características regionales. En algunos ríos no se ha podido asociar una línea de tendencia única, si no más bien una polinomial. Este hecho se ha interpretado como la presencia de ríos complejos de tramos compuestos que no han sufrido aún una homogeneización.

Se ha llevado a cabo además el análisis del índice de concavidad que es el parámetro que permite la estimación del grado de curvatura del perfil longitudinal. Para ello el área por debajo del perfil longitudinal se sustrae del total del área por debajo de la recta que une los dos extremos del perfil (Goldrick y Bishop, 2007). Una recta tendrá un valor 0, los valores serán más cóncavos cuanto más próximos a 1, y los negativos serán convexos. En teoría sería esperable que los ríos más evolucionados presenten un perfil más cóncavo que los de desarrollo más moderno o controlados por actividad tectónica reciente (Radoane *et al.*, 2003).

Río	Tramo	Long. km	Altitud m	Índice de concavidad	Función de tendencia
Bajo Guadiana		250	170	0.32	polinómica
Degebe	Alto	75	270	0.51	exponencial
Ardila		147	570	0.32	exponencial
Odearce		31	180	0.16	logarítmica
Terges-Cobre	Medio	124	350	0.32	potencial
Cardeira		12	180	0.38	exponencial
Foz		10	220	0.26	logarítmica
Limas		56	250	0.26	potencial
Oeiras	Bajo	145	280	0.11	potencial
Carreiras		130	290	0.12	potencial
Chanza		97	270	0.05	polinómica
Vasco		130	420	0.09	polinómica
Foupana		75	380	0.07	potencial

Tabla I.- Resumen de las principales características de los ríos de la cuenca del Bajo Guadiana con su índice de concavidad y tipo de curva de tendencia.

Table I.- Parameters of the Lower Guadiana Rivers Profiles showing concavity index and fitted function.

Resultados del análisis de los perfiles

Las funciones matemáticas ajustadas junto con los análisis de la concavidad de los perfiles longitudinales de los distintos ríos (Fig. 2 y Tabla I) permiten distinguir varias poblaciones que diferencian netamente los tres tramos estudiados del Bajo Guadiana. Un tramo alto donde dominan los cursos exponenciales, el bajo con dominio de funciones potenciales y otro intermedio con mezcla de ajustes logarítmicos y potenciales.

Estas tres regiones, a su vez están relativamente bien relacionadas con la concavidad de sus perfiles. El tramo bajo con dominio de funciones potenciales se caracteriza por la concavidad baja, mientras que el alto, con claro dominio de las funciones exponenciales, presenta una concavidad mayor (aunque esta nunca es excesiva). El tramo medio ofrece, igual que en el caso del ajuste de funciones, mezcla de poblaciones con ríos de mayor concavidad, más parecidos a los del tramo alto y otros muy heterogéneos.

Las tres regiones definidas por sus perfiles longitudinales son representativas de diferentes situaciones y, por tanto, susceptibles de interpretarse dentro de un marco evolutivo.

Discusión

Son numerosos los trabajos sobre el ajuste de funciones matemáticas a los perfiles longitudinales y su interpretación en relación con la evolución fluvial. Hovious (2000) en un estudio sobre 170 ríos en diferentes cordilleras, encuentra una representación más o menos proporcional de los tres tipos, pero también otros que no se ajustan a ninguno de ellos, especialmente los afectados por tectónica que suelen dar origen a formas convexas. Morris y Williams (1999), por la comparación entre ríos en todo el mundo, definen perfiles con formas exponenciales proporcionales con la disminución del diámetro a lo largo del perfil. La importancia de las relaciones carga y diámetro en la morfología del perfil ya había sido puesta de manifiesto por Snow y Slingerland (1987) a partir de modelos numéricos. Consideran que si la disminución de la carga y su diámetro es lento y progresivo se obtienen perfiles exponenciales, mientras que si el descenso del diámetro es rápido dominan las funciones logarítmicas. Por el contrario, si se produce un aumento progresivo de la carga y del caudal aparecen las funciones potenciales. Así mismo, dentro de un mismo río pueden considerarse diferentes tramos, como Ohmori (1989) que establece secuencias a lo largo

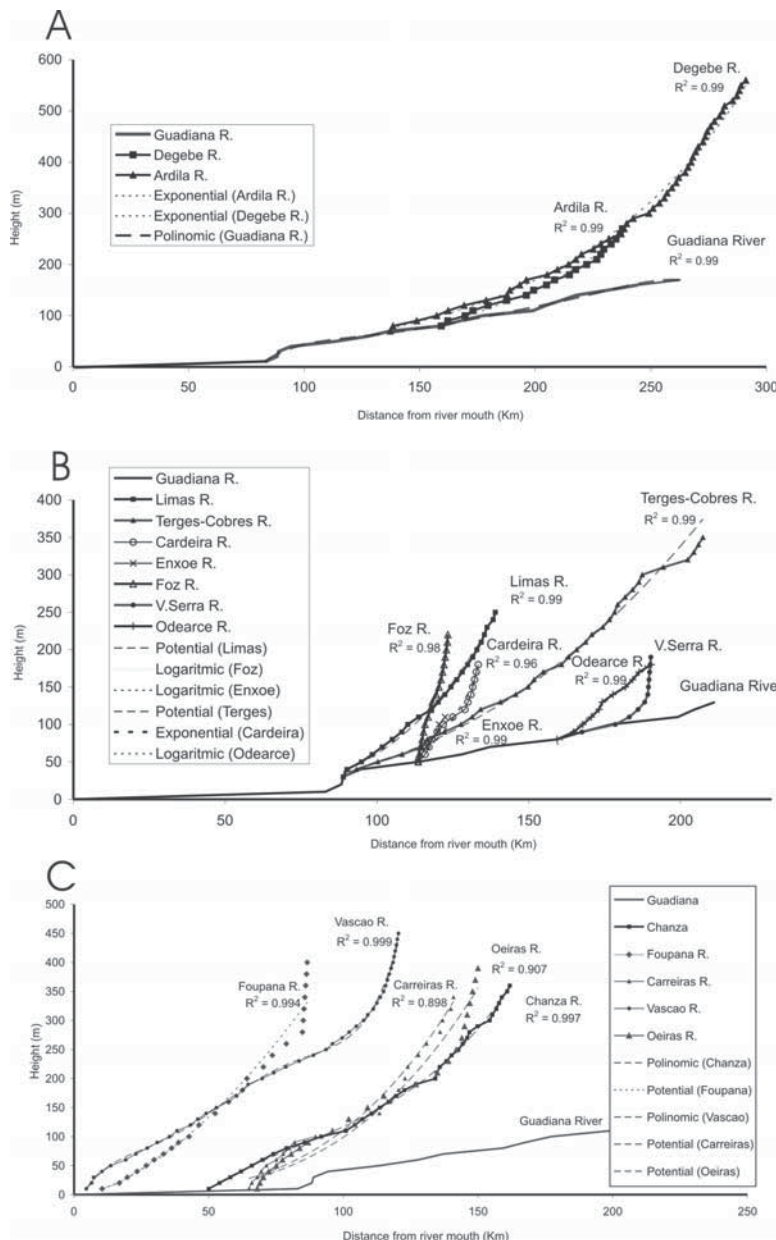


Fig. 2.- Perfiles longitudinales del Bajo Guadiana y sus afluentes, con las curvas de tendencia asociadas.

Fig. 2.- Lower Guadiana Rivers longitudinal profiles and fitted mathematical functions.

de los cauces determinadas por su relativa competencia para el transporte.

En nuestro caso, todos los ríos discurren encajados en el macizo y sin apenas materiales aluviales, por lo que el factor carga no debería representar grandes diferencias entre ellos. Por los datos de carga de que disponemos esta es escasa, aunque en general muy homogénea. Aún así, algunos de los aspectos reseñados por estos autores pueden ser aplicables en esta zona de estudio.

Los afluentes del tramo alto se ajustan bien a la morfología del río troncal, el Guadiana, a pesar de que los tributarios se encuentran representados en su longitud total, desde su cabecera, frente al Guadiana que solo comprende su parte baja. Todos

tienen un perfil exponencial muy similar (Fig. 2.) y además su concavidad es relativamente alta (Tabla I). Pueden interpretarse como formas más maduras por su concavidad (Radoane *et al.*, 2003), pero también en el sentido de una disminución progresiva, pero lenta, de la carga y de su diámetro (Snow y Slingerland, 1987; Morris y Williams, 1999), tal y como sería esperable de ríos más evolucionados.

El tramo bajo, desarrollado a partir del Pulo do Lobo, es radicalmente opuesto. Dominan los perfiles con funciones de ajuste potencial (Fig. 2.), pero todos ellos con una marcada convexidad en su base (Tabla I). La concavidad es muy baja (del orden de 0,10), lo cual puede indicar no tan

to su proximidad a un perfil recto ($C=0$) si no la influencia de la convexidad de la base que introduciría números negativos para la media del conjunto. Para Snow y Slingerland (1987) un ajuste potencial, implica un aumento de caudal y carga, y para Ohmori (1989) la posibilidad de transporte. Ambos casos pueden interpretarse como un incremento de la pendiente, que a su vez aumentaría la capacidad de mover mayor carga. En nuestro caso podemos interpretarlo de esta forma inversa, lo que implicaría un reflejo de la influencia tectónica (Hovious, 2000). Estos ríos estarían sometidos a un rejuvenecimiento por subsidencia de la zona de la costera, que conllevaría también una mayor capacidad de transporte y de carga.

El tramo intermedio resulta más difícil de interpretar. Se pueden separar un subconjunto de ríos, que presentan una función de ajuste potencial (Fig. 2.), esto es más parecida al tramo bajo, pero sin presentar la convexidad basal. Su concavidad, por tanto, es mucho más alta que la del tramo bajo, pues ya no presenta la anomalía convexa de su base (Tabla I), que posiblemente quede enmascarada en la zona de salto activo (*knickpoint*) del Pulo. De hecho, estos afluentes son los más largos y próximos a este punto de inflexión, por lo que podrían interpretarse como afectados por el rejuvenecimiento, pero sin haber llegado a adaptar su perfil.

Una segunda población de este tramo intermedio, consiste en afluentes mucho más cortos, con funciones de ajuste logarítmico (Fig. 2.). Para Snow y Slingerland (1987) este tipo de ajuste es el que define a los ríos con un descenso rápido de la carga aguas abajo. Nosotros los hemos asociado a ríos en estadio juvenil, cortos, con cabecera directamente en la planicie y sin integración con otros drenajes, y por tanto poco evolucionados pero con acusada pendiente lo que permite que el principal factor de control sea el tamaño de su carga. Su índice de concavidad es muy variable (0,16-0,68) para lo cual no encontramos explicación, salvo precisamente el posible estadio juvenil de estos cauces. No puede descartarse tampoco, alguna influencia litológica pues se encuentran en la zona de la cubeta terciaria de Moura con alternancia de materiales sedimentarios, metamórficos y también con presencia de granitos. Un aspecto muy importante a destacar es que el comienzo de este tramo coincide con la falla de Vidigueira que es una estructura varisca reactivada que con dirección E-O superpone a las pizarras paleozoicas sobre los sedimentos terciarios de la cuenca de Moura. Diversos estudios han puesto de manifiesto la actividad Plio-Cuaternaria de las

fallas de Vidigueira y Alqueva, y que afectan al tramo Bajo del valle del Guadiana y relacionadas con un cabalgamiento alpino (tasas de desplazamiento de 0,056 a 0,095 mm/año para la falla de Vidigueira y de 0,0025 mm/año para la de Alqueva, Brum da Silveira *et al.*, 1998, 2007).

Conclusiones

En síntesis, podemos hablar de la distinción de tres tramos bien definidos. Se ha interpretado la presencia de unos ríos ajustados a un nivel de base estable en el tramo alto y que por tanto no parecen haber sufrido proceso de rejuvenecimiento aguas arriba de la depresión de Moura. Por el contrario los ríos por debajo del *knickpoint* del Pulo estarían ya en reajuste avanzado al descenso del nivel de base definido en la costa por la flexura del Guadalquivir.

Se presenta otro tramo intermedio, complejo, en que los ríos más grandes, con mayor potencia fluvial, parecen estar iniciando ya su adaptación al nivel de base inferior, a pesar de la persistencia del escalón del Pulo. Por el contrario, otros más cortos mantienen un estadio incipiente de evolución, posiblemente controlados por la actividad de la falla de Vidigueira.

Las conclusiones que se pueden extraer de ello apoyan la hipótesis de la lentitud de adaptación de los perfiles en roca a los cambios en el nivel de base. La plataforma rocosa debe representar por tanto un nivel de base muy antiguo, que los ríos no son capaces de eliminar fácilmente. Mientras los ríos por debajo del *knickpoint* ya están modelando su perfil convexo, los de por encima del Pulo aún se adaptan a este nivel de base colgado, y que puede considerarse por tanto una plataforma relictica confirmando los escasos datos cuantitativos existentes sobre la lentitud del retroceso de los escarpes en roca resistente y su poder de ralentización de la erosión remontante.

Para explicar la reactivación de la red fluvial por el sur hay que tener en cuenta la flexura del Guadalquivir que coincide a grosso modo con la desembocadura del Guadiana y la inflexión progresiva de la superficie pretortoniense durante la evolución del surco bético. Frente a la escasa actividad sísmica general de la cuenca del Guadiana, en el tramo bajo se produce un número importante de terremotos (Borges *et al.*, 2001).

Agradecimientos

El presente trabajo se ha realizado con el apoyo de los proyectos BTE 2003-04572 y CGL2004-033049 de la MCYT y 910391 de la UCM.

Referencias

- Borges, J.F., Fitas, A., Bezzeghoud, M. y Teves-Costa, P. (2001). *Tectonophysics*, 337, 373-387.
- Brum da Silveira, A., Cabral, J., Araújo, A. y Espinha Marques, J. (1998). En: *4ª Conferência Anual GGET'98*, 2, 137-140.
- Brum da Silveira A., Cabral, J. y Ribeiro A. (2007). *Geophysical Research. Abstracts*, 9, 01642.
- Feio M. (1947). Os terraços do Guadiana a jusante do Ardila. *Comunicações Serviço Geológico Portugal*, 27, 3-83.
- Garzón, G., Ortega, J.A., Duran, J.J. y Muñoz, P. (2005). En: *6th Geomorphological International Conference. Abstracts*, 505
- Goldrick, G y Bishop P. (2007). *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 649-671.
- Hovious, N. (2000). En: *Geomorphology and Global Tectonics*, (M.A. Summerfield, Ed.). Wiley, 77-101.
- Howard, AD. (1980). En: *Thresholds in Geomorphology* (D.R. Coates y J.D. Vitek, Eds.). George Allen and Unwin, 227-258.
- Howard AD. (1998). En: *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*, (K.J. Tinkler y E.E. Wohl, Eds.). American Geophysical Union. Geophysical Monograph, 107, 297-319.
- Morris, P.H. y Williams, D.J. (1999). *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 867-879.
- Ohmori, H. (1991). *Journal of Geology*, 99, 97-110.
- Ortega, J.A. (2007). *Paleocrecidas, avenidas recientes e hidroclimatología en la cuenca media y baja del río Guadiana*. Tesis Doctoral, Univ.Complutense de Madrid, 535 p.
- Radoane, M., Radoane, N. y Dumitriu, D. (2003). *Geomorphology*, 50, 293-309.
- Sklar, L.S. y Dietrich, W.D. (1998). En: *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*, (K.J. Tinkler y E.E. Wohl, Eds.). American Geophysical Union. Geophysical Monograph, 107, 237-260.
- Sklar, L.S. y Dietrich, W.D. (2001). *Geology*, 29-12, 1087-1090.
- Snow, R.S. y Slingerland, R.L. (1987). *Journal of Geology*, 95, 15-33.
- Tinkler, K.J. y Wohl, E.E. (1998). En: *Rivers over rock: fluvial processes in bedrock channels*, (K.J. Tinkler y E.E. Wohl, Eds.). American Geophysical Union. Geophysical Monograph, 107, 1-18.