

# CAMBIO AMBIENTAL Y EQUILIBRIO DINÁMICO DE LOS CAUCES

*Carmelo Conesa García*

Universidad de Murcia

## RESUMEN

En el presente artículo se analiza la respuesta morfológica de los cauces aluviales a las variaciones de caudales de agua y sedimentos a corto, medio y largo plazo. A corto plazo, el sistema fluvial incorpora variaciones parciales o locales, debidas a sucesos hidrológicos de cierta efectividad morfológica o alteraciones de consecuencias inmediatas introducidas por el hombre (construcción de puentes, traviesas, diques,...). Los ajustes del sistema a medio plazo se hallan más frecuentemente forzados por actividades humanas que originan un desequilibrio temporal en el cauce. A largo plazo el sistema fluvial experimenta ajustes graduales y progresivos en busca de una situación de equilibrio con los cambios ambientales. Todas estas modalidades de respuesta son aquí descritas por separado, si bien en algunos casos guardan gran relación entre sí, resultando difícil atribuir una misma adaptación morfológica a una sola escala temporal.

**Palabras clave:** Sistema fluvial, cauce, ajuste morfológico, equilibrio dinámico, cambio ambiental.

## ABSTRACT

This paper reports a study about the alluvial channel response to variations of water and sediment discharges in the short, mean and long-term. Short term, the fluvial system incorporates partial or local variations, due to hydrological events of morphological effectiveness or alterations of immediate impact introduced by engineering works (construction of bridges, crossbeams, dikes,...). System adjustments in the mean term are found more frequently forced for human activities that originate a temporal disequilibrium on the channel. Long term the channel system experiences gradual and progressive adjustments searching a situation of equilibrium with the environmental changes. All these modes of responses are here described by separating, although in certain cases keep great relationship, resulting difficult to attribute a same morphological adjustment to an only temporal scale.

**Key words:** Fluvial system, channel, morphological adjustment, dynamic equilibrium, environmental change.

Fecha de Recepción: 15 de septiembre de 1999.

\* Departamento de Geografía Física, Humana y Análisis Regional. Facultad de Letras. Universidad de Murcia. Campus de la Merced • 30001 MURCIA (España). E-mail: cconesa@fcu.um.es

Los cauces naturales rara vez alcanzan un perfecto estado de equilibrio. No sólo varían las características hidrodinámicas de las corrientes, también lo hacen los procesos y unidades geomórficas, los aportes sedimentarios de sus afluentes e incluso la forma y tamaño de los depósitos de lecho. El resultado de este continuo cambio es una variación concomitante con la morfología global del cauce, pero al cabo de varios años, los efectos de excavado y relleno se compensarán para mantener la estabilidad.

La morfología del cauce se ajusta a largo, medio y corto plazo a los cambios de los caudales de agua y sedimentos, manteniendo un equilibrio dinámico acorde con las condiciones impuestas por el cambio medioambiental.

### **AJUSTES A CORTO PLAZO Y VARIACIONES LOCALES DEL CAUCE**

La morfología del cauce puede ser alterada a corto plazo por la ocurrencia aleatoria de sucesos hidrológicos extremos. Estos son capaces de originar cambios profundos en la sección transversal, trazado y pendiente del río, empleando para ello períodos de días e incluso de horas. También la acción del hombre tiene en ocasiones una respuesta rápida por parte del cauce, que normalmente se traduce en una variación morfológica local.

En el contexto de una morfología fluvial dinámica, la secuencia de excavado - relleno depende localmente de la forma de las secciones transversales del cauce (Andrews, 1982). Aguas abajo de un pequeño embalse, situado en las tierras bajas de Gran Bretaña, 15 años después de su construcción, Petts y Pratts (1983) observaron un incremento doble de la capacidad del cauce inmediatamente al pie de la presa. García-Ruiz y Puigdefábregas (1985) han estudiado los efectos de pequeñas presas construídas en cauces anastomosados del Pirineo Central y han podido constatar varios cambios locales en su perfil, con una disminución de la pendiente y de la capacidad de almacenamiento. Por otra parte, para evaluar la importancia relativa de la pendiente y de la distancia a la presa en la distribución granulométrica del cauce, estos autores adoptaron un análisis de regresión múltiple, utilizando ambas variables como predictores y el porcentaje de gravas y cantos pequeños como variable dependiente.

El ajuste de la morfología del cauce a un nuevo equilibrio estable no se realiza normalmente mediante un cambio unidireccional, sino a través de una compleja secuencia de cambios que incluyen períodos alternativos de erosión y deposición (Wolman, 1967; Howard y Dolan, 1981). El efecto inmediato a la construcción de las presas se traduce en una rápida degradación del cauce, a partir de la cual se inicia una modificación morfológica más completa (Schumm, 1969). En medios frágiles la degradación inicial puede adquirir cierta espectacularidad por la magnitud y ritmo de incisión. Un reciente estudio llevado a cabo en terrenos inestables del Sureste Español (Conesa García *et al.*, 1997) muestra la respuesta instantánea de cauces abarrancados a la construcción de presas de retención de sedimentos. El ejemplo más singular lo constituye un sistema escalonado de presas de contención que tiene por finalidad estabilizar el lecho torrencial de Los Guillemos (Mula) y proteger así el trazado del Trasvase Tajo Segura a su paso por este punto. El importante déficit de finos registrado por el barranco y la erosión en piping, asociada a la naturaleza de los materiales retenidos y a la desaceleración de la corriente, ha provocado

aguas debajo de las presas una fuerte incisión sobre el lecho antiguo del cauce y una erosión regresiva galopante (1 m/año).

Martín Vide y Blade (1993) han calculado la *erosión local* que se produce aguas abajo de la presa del canal de la margen derecha del río Llobregat, con objeto de conocer su alcance y determinar la distancia y profundidad adecuadas del cruce de un sifón proyectado bajo el río en dicho tramo.

Para caudales moderados y grandes existe un gran número de fórmulas empíricas sobre erosión local. Entre ellas puede citarse la fórmula de Jacger (Novak *et al.*, 1990) (ecuación 1), obtenida a partir del estudio de cuencos amortiguadores de resalto hidráulico en presas, la de Martín-Del Agua (1992) (ecuaciones 2 y 3) deducida para umbrales, rastrillos o traviesas de estabilización de cauces de pequeña altura, y la de Breusers y Raudkivi (1991) (ecuación 4), aplicada a barreras sumergidas holandesas.

$$e = 0.55 (6 H^{0.25} q^{0.5} (y_0 / D_{90})^{1/3} - y_0) \quad (1)$$

donde  $H$  es la diferencia entre la línea de energía aguas arriba y la lámina aguas abajo;  $q$  es el caudal por unidad de anchura;  $y_0$ , el calado aguas abajo de la presa y  $D_{90}$  el tamaño de las partículas, 90 por ciento en peso (mm).

$$\frac{e}{H_0} = 1.27 \left( \frac{q^{2/3}}{g^{1/3} H_0} \right)^{-0.42} \quad (2)$$

$$\frac{L}{e} = 9.03 \left( \frac{q^{2/3}}{g^{1/3} H_0} \right)^{2.58} \quad (3)$$

donde  $e$  es la profundidad de la erosión local;  $L$ , la semilongitud del foso de erosión;  $q$ , el caudal unitario;  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ; y  $H_0$ , la altura de la estructura sobre el cauce.

$$\frac{e}{y_0} = (t / t_1)^{0.38} \quad (4)$$

siendo  $t$  el tiempo en horas y  $t_1$  un tiempo característico que se calcula según

$$t_1 = \frac{330 \left( \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{1.7} y_0^2}{(\alpha v - v_{cr})^{4.3}} \quad (5)$$

donde  $\rho_s$  y  $\rho$  son respectivamente la densidad del material del lecho y del agua;  $\alpha$  es un factor tabulado dependiente de la altura de la barrera, la longitud protegida y el calado,  $v$  es la velocidad media aguas abajo de la presa y  $v_{cr}$  la velocidad media crítica a partir del criterio de Shields.

## AJUSTES A MEDIO PLAZO Y LA INFLUENCIA DEL HOMBRE

Los ajustes a medio plazo son amenudo provocados por actividades humanas que crean un desequilibrio temporal en el cauce, obligándole a atravesar por toda una serie de «estados transitorios» en busca de un nuevo equilibrio. Tales cambios inducidos por el hombre incluyen efectos *directos* causados por la planificación deliberada del río para controlar la corriente, regular el suministro de agua o mejorar la navegación, y cambios *indirectos* producidos por la alteración en los usos del suelo que afectan a la escorrentía superficial y producción de sedimentos (Park, 1981).

La cuenca del río Mississippi es una de las más modificada en este sentido. Por ejemplo, la revegetación de los márgenes y la construcción de pequeñas presas llevadas a cabo por el *U.S. Soil Conservation Service* durante los años 1950 y 1960 sirvieron para estabilizar los márgenes del cauce y reducir el suministro de sedimentos a la corriente principal. De acuerdo con el concepto de *energía por unidad de corriente*, una disminución de la concentración de sedimentos, *Ct*, tendría su correspondiente reducción de energía por unidad de corriente (*VS*). De hecho, el reestablecimiento de la situación de equilibrio se efectuó mediante la formación de nuevas barras de arena a lo largo del lecho (Yang y Song, 1982). En los años 70, el cauce había adquirido un trazado más meandriforme, lo que supuso una nueva reducción del producto *VS* o energía por unidad de corriente.

Las obras de regulación y acondicionamiento realizadas por el *U.S. Army Corps of Engineers* en el río Tallahatchie (décadas 1930 y 1940) acortaron considerablemente su recorrido y rebajaron la altura del lecho.

En cambio, los ajustes dinámicos del Bajo Mississippi en respuesta a la variación de los controles medioambientales concuerdan más con la teoría de la *tasa mínima de disipación de energía*. El tramo meandriforme es relativamente estable, mientras que el rectilíneo, constituido por sucesivas cortas y realineamientos, presenta gran inestabilidad y requiere un amplio trabajo de mantenimiento para adecuarlo a la navegación. Sin duda, en este caso se cumple plenamente la afirmación hecha por Yang (1971) de que la meandrización es un medio muy eficaz para que el río minimice su tasa de disipación de energía.

El encauzamiento o rectificación de los ríos es quizá la intervención humana que ha provocado más problemas de incisión de cauces. Con este tipo de actuación se trata de evitar problemas de inundación, capacidad de desagüe y protección de márgenes, pero ello trae consigo un aumento de la velocidad y un incremento notable de la tensión de corte del flujo, que favorecen los procesos de erosión regresiva. Éste es el caso del tramo bajo del Segura, entre La Contraparada y Guardamar, acondicionado desde 1990 para una capacidad de 400 m<sup>3</sup>/s mediante el ensanche de su cauce primitivo y numerosas cortas de meandro que aumentan la pendiente longitudinal de su lecho (Botía Pantoja, 1992) (figura 1). De esta forma, se aminora el riesgo de desbordamiento pero también se altera su estado de equilibrio y los umbrales hidromorfológicos relacionados con la frecuencia y magnitud de los caudales (Conesa García, 1995).

En Europa existen otros muchos ejemplos de canalizaciones que han supuesto cambios apreciables en la dinámica del cauce. El confinamiento de altos caudales entre los diques rectilíneos del Canal Miribel construido aguas arriba de Lyon (1848-1858) incrementó la energía del Ródano en el tramo afectado y provocó aguas arriba del Canal un rebajamien-

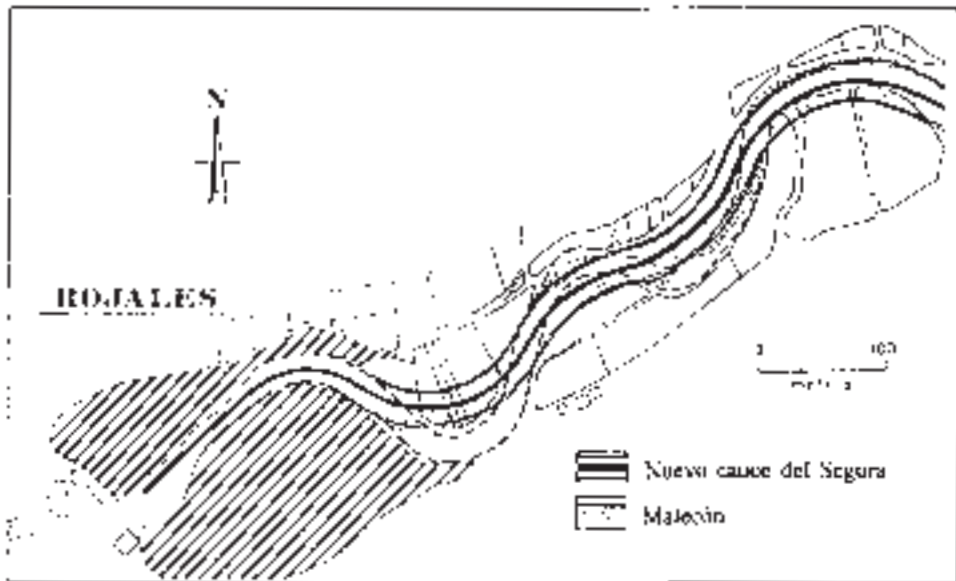


FIGURA 1. Encauzamiento actual del Río Segura. Sector Rojales-Guardamar (Alicante).

to del lecho superior a cinco metros entre 1857 y 1930 (Bravard y Bethemont, 1989). Descensos del lecho se observan también en el Bajo Rhin, sobre todo entre 1930 y 1960, período en el que su cota quedó rebajada un metro (Van Urk y Smit, 1989). Como causas de tal rebajamiento cabe resaltar: las cortas de meandros, las actividades de dragado para mantener sus condiciones de navegabilidad, las actividades mineras bajo el lecho fluvial, la regulación de los tributarios y la constricción de su propio cauce.

### Influencia de los cambios de uso del suelo

Los cambios de usos del suelo por repoblaciones, deforestaciones, urbanizaciones, puestas en regadío, drenajes, etc. alteran el régimen hidrológico y las relaciones suelo-agua en las laderas, teniendo una repercusión inmediata en los cauces en términos de aportaciones totales, distribución de las mismas a lo largo del año, y carga de sedimentos o erosión neta transportada hacia los cauces (González del Tánago y García de Jalón, 1998). Las mayores diferencias se observan entre las tierras de cultivo, pastos y bosques, siendo también más acusados los contrastes entre las correspondientes tasas de pérdida de suelo que las de escorrentía. Por ejemplo, Pierce *et al.* (1973) comprobó que la tala o clareo en una superficie vertiente del bosque experimental de Hubbard Brook, New Hampshire, suponía multiplicar por 9 la producción de sedimentos y por 5 el volumen de arroyada. Dado el amplio alcance superficial que suelen tener los cambios de uso del suelo, sus efectos en los cauces fluviales amenudo no pueden ser comparados espacialmente. Existen no obstante estudios estratigráficos que prueban la agradación en los valles de Pedmont después de la roturación del bosque y la práctica de una agricultura intensiva.

Las modificaciones globales de los sistemas fluviales mediterráneos se deben a la ocurrencia de sucesos hidrológicos extremos separados por amplios intervalos de tiempo (Poesen y Hooke, 1997). Para mitigar los efectos de estas avenidas se han llevado a cabo importantes acciones hidroforestales a lo largo del siglo XX (repoblaciones forestales, prácticas de conservación de suelos,...) (Mateu Bellés, 1990), que han permitido en determinadas cuencas retrasar la formación de los caudales punta, reducir la magnitud de las crecidas ordinarias y disminuir las tasas de erosión. No obstante el control de la vegetación sobre escorrentías de esta magnitud es limitado y suele aparecer acompañado de otras acciones estructurales y no estructurales que hacen difícil discriminar la influencia de las citadas restauraciones.

### **Efectos de la regulación del régimen**

En ríos regulados, la geometría hidráulica del cauce puede variar de un tramo a otro a causa de ligeras diferencias impuestas en el régimen de explotación de sus embalses, a las que normalmente van asociadas modificaciones en el tamaño del material del lecho, en el perfil transversal del cauce e incluso en la propia pendiente del valle. La interacción de estos parámetros puede producir también un único ajuste como respuesta a la regulación hecha aguas arriba.

Los múltiples cambios observados en el cauce han sido estudiados desde un punto de vista empírico por Schumm (1969). En cualquier punto de un río regulado, estos cambios aparecen relacionados con las variaciones de caudal y carga de sedimentos, pudiendo distinguirse hasta cuatro categorías de ajustes (figura 2): Una disminución de ambos parámetros implica una mayor constricción del cauce. Si la carga de sedimentos se ha reducido ampliamente pero los caudales apenas han sido afectados, se producirá entonces una degradación del cauce, aumentarán sus dimensiones y se reducirá la pendiente. Aguas abajo de pequeños embalses, dentro de los cauces con lecho de arena, o en medios donde el ritmo de establecimiento de la vegetación es lento y el crecimiento mínimo, las liberaciones de agua por la presa podría originar una degradación progresiva. Por el contrario, aguas abajo de grandes embalses, de defensa contra-inundaciones, en ríos con gravas, o en lugares con alta tasa de colonización vegetal —y asumiendo un continuo suministro de sedimentos—, se alcanzará un ajuste rápido, caracterizado por una disminución de la anchura y capacidad del cauce.

En un intento de analizar la respuesta integrada de la capacidad y la forma del cauce, Petts (1980b) adoptó una modificación del *factor de transmisión*, utilizando el método de pendiente-transmisión para la determinación del caudal (Sokolov *et al.*, 1976), a fin de conseguir una mejor estimación de los cambios del cauce. Este factor fue empleado para comprobar el grado de similitud estadística entre las secciones transversales de un mismo tramo, y, en conjunto, proporcionó una descripción mejorada de la tendencia de cambio.

Poco después, Pratts (1983) estudió la interacción de las variables morfológicas, incluyendo el tamaño del material de lecho y la resistencia límite, dentro de un tramo de 6,5 kms aguas abajo del embalse de Blackbrook (Reino Unido), y demostró claramente que los procesos degradacionales y agradacionales pueden concurrir en un punto dado y origi-

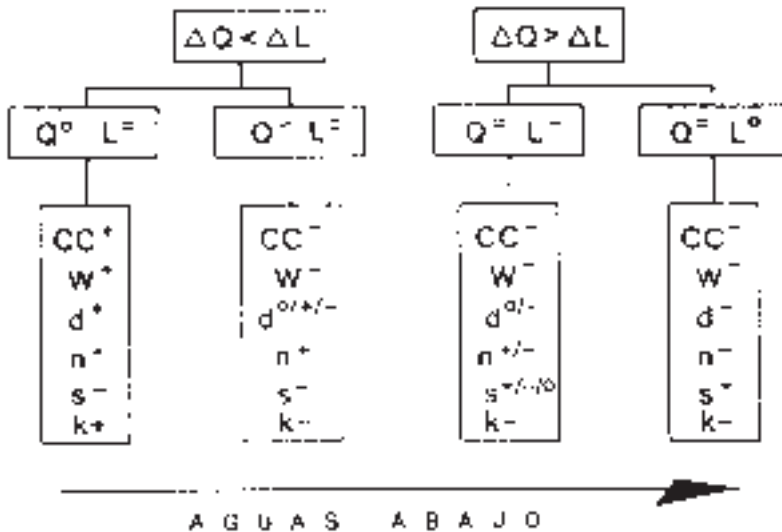


FIGURA 2. Ajustes de la forma del cauce aguas abajo de las presas. Una variación del caudal (Q) y de la carga de sedimentos (L) provoca cambios en la capacidad (CC), anchura (W), profundidad (d), rugosidad (n), pendiente (s) y transporte del cauce (k).

nar un cauce de sección transversal más pequeña pero con material de lecho más grueso. Los procesos de erosión selectiva suelen condicionar la composición del material de lecho y la pendiente local, pero la acreción a lo largo de los márgenes, favorecida por un rápido establecimiento de la vegetación y mantenida por una redistribución del material de lecho, normalmente reduce las dimensiones del cauce.

Los cambios en el transporte de sedimentos han sido aménudo identificados como los impactos más importantes en la valoración de los problemas medioambientales de este tipo de ríos. Frecuentemente, los embalses almacenan más del 90 por ciento de la carga de sedimentos suministrada por sus cuencas de drenaje, experimentando un relleno progresivo que continuamente modifica su grado de eficacia. Reducciones medias anuales de la capacidad de almacenamiento superiores a 0,5 por ciento se han observado en numerosos embalses de Europa (Cyberski, 1973; López Bermúdez, 1986, Romero Díaz *et al.*, 1992), antigua URSS central (Yakovleva, 1965), USA (Frickel, 1972) y Nigeria (Oyebande, 1981). En la cuenca del Segura, esta tasa se sitúa entre 0,3 y 3,9 por ciento/año, manteniendo una correlación positiva con la razón caudal específico de la cuenca / capacidad del embalse ( $r = +0.82$ ) (Conesa García *et al.*, 1993). La retención de esta importante carga de sedimentos en el vaso del embalse provoca una erosión muy fuerte aguas abajo (Hales *et al.*, 1970; Petts, 1984).

La degradación y excavado del cauce puede tener efectos nefastos sobre las estructuras y obras de acondicionamiento (puentes, motas, terraplenes de carreteras, malecones, etc.). En el Oeste de Pakistán, p.e., la degradación del cauce rebajó los umbrales que lo separaban de las infraestructuras de derivación y redujo la eficiencia de los canales de rie-

go (Gill, 1968). Una situación más extrema se registra en el río Guadalentín aguas abajo del embalse de Puentes (Lorca), cuya capacidad se ha visto rebasada en sucesivas ocasiones desde finales del siglo XIX. La incisión del cauce puede implicar asimismo efectos positivos y deseables. Por ejemplo, en la bifurcación norte del río Broad y en Barber Creek —Georgia—, USA, supuso una mayor capacidad de drenaje y aminoró sustancialmente el riesgo de inundaciones (Miller, 1962). En otros ríos, como el Chang Jiang y el río Arkansas, la degradación aguas abajo de determinados embalses favoreció las condiciones de navegación (Antonio, 1969; Changming y Dakang, 1983).

En áreas costeras, sin embargo, los procesos erosivos derivados de la regulación suelen producir sólo efectos negativos. Este es el caso de determinadas playas de Mozambique, especialmente vulnerables a los cambios que alteran el delicado balance entre erosión y deposición fluvial. Como resultado de una intensa regulación de cabecera, existen, incluso, formaciones deltaicas en fase de retroceso (río Rioni —Makkaveyev, 1970—) o con menor ritmo de crecimiento, como ocurre en el río Ebro.

En general, todo cambio de un cauce supone una readaptación de su morfología de un estado en cuasi-equilibrio a otro. Este proceso de readaptación implica una migración de zonas de erosión y/o sedimentación que tiende a restablecer dicho equilibrio morfológico.

Durante las últimas décadas se ha progresado bastante en el conocimiento de los efectos de las presas en la geometría y modelos de cauces (Petts, 1984). Un importante paso ha sido reconocer que la regulación no sólo afecta a los sectores inmediatamente situados al pie de la presa sino también a tramos más extensos, cuya magnitud depende de la intensidad de explotación de los embalses y de las características medioambientales de las subcuencas reguladas. Un segundo avance se ha producido en relación con las escalas de tiempo bajo las que se desarrolla la respuesta geomorfológica (Petts, 1980a). Determinados cambios significativos han sido constatados en algunos ríos 50 años después de la construcción de sus presas (Petts, 1978). En otros casos, como ocurre en el río Colorado, aguas abajo de la presa del Glen Canyon, la estabilidad, en términos de transporte de sedimentos y forma del cauce, puede durar hasta 200 años (Laursen *et al.*, 1975). Sin embargo, en sistemas fluviales inestables, asociados a medios áridos y semiáridos, pueden observarse cambios apreciables en menos de 5 años (Conesa García, 1994).

### **Efectos de la urbanización**

La urbanización implica una variación cíclica más compleja de la producción de sedimentos, que resulta extremadamente alta en la fase de construcción, pero generalmente muy reducida cuando existe un completo desarrollo urbano.

Las secciones transversales se agrandan eventualmente para acomodar los picos de inundación urbana. La anchura y profundidad aumentan en diferente grado conforme crece la sección transversal. Los ratios de crecimiento del cauce varían espacialmente, disminuyendo aguas abajo a partir del área urbana. También varía temporalmente a medida que progresa el ciclo de sedimentación. Durante una etapa de excesiva producción de sedimentos las secciones transversales no pueden agrandarse de forma significativa (Hollis y Lockett, 1976), e incluso pueden disminuir de tamaño (Leopold, 1973) si la elevación del lecho es más rápida que la acreción de la llanura de inundación. Además, al crecimiento



del cauce suele preceder una etapa crítica, en la que se produce un aumento importante del caudal y de la competencia de la corriente; Según Morisawa y Laflure (1979) este estadio se alcanza cuando al menos el 25 por ciento de la cuenca tiene más del 5 por ciento de superficie impermeable.

En los tramos urbanos de los ríos la necesidad de encauzar proviene frecuentemente del peligro de inundación para la población. Además el crecimiento de la ciudad suele restar espacio al río y confinarlo. El revestimiento de los márgenes reduce la capacidad de erosión y arrastre de material en el tramo encauzado, disminuyendo el transporte de sedimentos aguas abajo y la acumulación de finos sobre la llanura de inundación en caso de desbordamiento. Cuando el recubrimiento se hace extensivo a la solera del cauce, se impide que el lecho descienda transitoriamente por erosión general, cambiando las condiciones de circulación del caudal máximo e interrumpiendo la comunicación del río con posibles formaciones acuíferas aluviales.

### **Industrias extractivas**

Este tipo de industrias genera enorme cantidad de residuos y materiales sueltos, así como depósitos sin vegetación (*vacies o terreras*), inestables, sobre los que amenudo incide la erosión lineal. Uno de los ejemplos más representativos, en nuestro país, es el extraordinario volumen de residuos minerales que, procedente de la Sierra de la Unión, es transportado hasta el Mar Menor a través de las ramblas Ponce, Beal y Miedo. Ello plantea un serio problema medioambiental en esta zona, al incrementar el empobrecimiento de las tierras circundantes como consecuencia de desbordamientos esporádicos (Conesa García, 1989).

Fuera de España, existen numerosos sistemas fluviales alterados por este tipo de actividad. Quizás el más espectacular sea el cambio experimentado por los cursos de la franja norte de los Peninos (Gran Bretaña), donde en el período 1840-1940 se concentró la tercera parte de la producción de mena del país. Durante el s. XIX, en los sectores de mayor explotación (líneas divisorias del Tyne, Jeas y Wear), tuvo lugar una profunda metamorfosis del cauce y de la llanura de inundación. De un modelo de cauce meandriforme se pasó a otro «braided», asociado al relleno del fondo del valle, al que siguió una incisión y el retorno a un único cauce en el presente siglo (Lewin *et al.*, 1988).

Muy frecuente y grave, sobre todo a lo largo del presente siglo, ha sido la extracción de material del cauce destinado a la construcción. Una extracción de gran magnitud y duración puede ser equivalente a una interrupción total del transporte sólido aguas abajo y a un descenso brusco del fondo aguas arriba (Martín Vide, 1997). En otros casos, la intensa explotación de áridos ha provocado rupturas de pendiente y profundos cambios en las propiedades texturales de los depósitos aluviales. Ello aumenta la inestabilidad del cauce y produce importantes variaciones en la morfología del lecho.

### **VARIACIONES A LARGO PLAZO**

Las influencias a largo plazo —climáticas, hidrológicas, tectónicas— originan un ajuste gradual, progresivo y común de la geometría de los cauces aluviales para mantener un

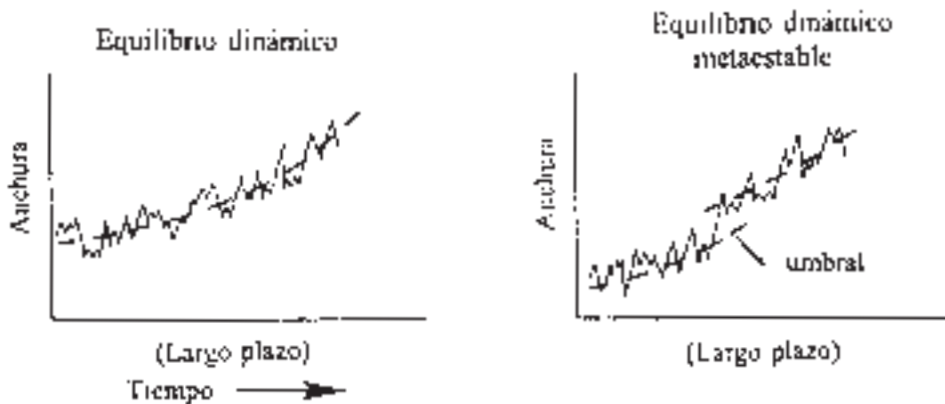


FIGURA 3. Distribución esquemática de tipos de equilibrio a largo plazo (Schumm, 1975).

«*equilibrio dinámico*». Para esta misma escala de tiempo, Schumm (1975) sugiere un equilibrio continuo —*equilibrio dinámico metaestable*— condicionado por la existencia de umbrales en el sistema fluvial (figura 3). Las terrazas aluviales constituyen una respuesta lógica a este tipo de comportamiento. La formación de las terrazas se debe a dos controles básicos: los cambios relativos del nivel de base y las variaciones de la ratio caudal-producción de sedimentos impuesta por las condiciones medioambientales de la cuenca. La incisión del río puede ser provocada por un descenso del nivel de base asociado a un movimiento tectónico o isostático, por un descenso eustático del nivel marino o por un descenso del nivel de base local.

Dentro de este grupo de variaciones se incluyen también los ajustes fluviales a escala de tiempo histórico. En los Alpes, a través de fuentes documentales históricas y datos cartográficos, se han constatado cambios a largo plazo en el tipo de trazado de los cursos de montaña (Bouchayer, 1925). Así, el río Drac pasó de tener un único cauce antes del siglo XV a ser un río de numerosos cauces entrecruzados a finales de la misma centuria. Mills fue destruida por las inundaciones, como también lo fueron las murallas de la ciudad de Grenoble. La zona «braided» se hizo más ancha y creció gracias a la formación de nuevas barras de gravas y a las sucesivas acumulaciones de troncos. Estos rigurosos cambios se atribuyeron principalmente a la deforestación, pero la crisis climática, conocida como la *Pequeña Edad de Hielo*, probablemente jugó un papel primordial. En el Macizo del Mont Blanc la *Pequeña Edad de Hielo* fue la responsable, durante el siglo XVII, de suministros de sedimentos de gran tamaño y energía. Los sedimentos fueron transportados progresivamente aguas abajo durante toda la centuria siguiente, originando megaformas aluviales en las tierras llanas del valle (Peiry, 1988).

En España, la zona del Guadalquivir aguas abajo de Sevilla, en las Marismas, y los tramos medio y bajo del Ebro presentan los cauces más dinámicos y cambiantes. Menanteau y Vanney (1985) han comprobado que los primitivos brazos del Guadalquivir, en las Marismas, tenían una gran rectitud. La existencia de paleocauces menos sinuosos y más anchos, dotados de una amplitud no atribuible totalmente a un régimen fluvial, indica que

el antiguo drenaje estaba relacionado con una marisma de influencia mareal. En la primera mitad del siglo XVIII se pasa a un régimen de estuario, con meandros de curvatura amplia y constante; y finalmente durante los dos últimos siglos, la intensa acción humana ha convertido al Bajo Guadalquivir en un estuario artificial casi rectilíneo. En el río Ebro los tramos más sinuosos son los más dinámicos (Ollero-Ojeda, 1990; Conesa García, 1993), como lo muestran las secciones de meandros abandonados (Villafranca de Ebro, Fuentes de Ebro, etc.) y los frecuentes topónimos relacionados con la migración del cauce (deja, mejana, sequeros, sotos, galachos, ...).

En un estudio referido a los últimos siglos, Probst y Tardy (1987) comprobaron que las fluctuaciones de corriente más significativas de los cincuenta ríos mayores del mundo eran sincrónicas a escala regional e incluso en pequeñas áreas continentales. En grandes áreas continentales o entre dos continentes diferentes dichos autores demostraron que las mismas fluctuaciones de caudales podían desplazarse algunos años (por ejemplo 9 años de retardo entre África y Europa).

En la figura 4 se representan las fluctuaciones de caudales de catorce ríos seleccionados en Europa, usando datos estandarizados respecto a caudales medios anuales establecidos a largo plazo. En los dos últimos siglos han podido contabilizarse cuatro períodos húmedos netos: 1840-50, 1870-80, 1910-40 y 1960-70. Durante todos ellos, los ríos analizados en detalle (Danubio, Garona, Vanern Gota y Loira) muestran una alta correlación entre descarga acuosa y tasas de transporte específico. Es de destacar que la carga de sedimentos medida por Baumgarten (1848) para el período 1840-50 fue del orden de  $100 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , o sea 4 ó 5 veces más el transporte específico ( $20\text{-}30 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) dado por Probst y Bazerbach (1986) para el período 1970-80, considerado húmedo moderado.

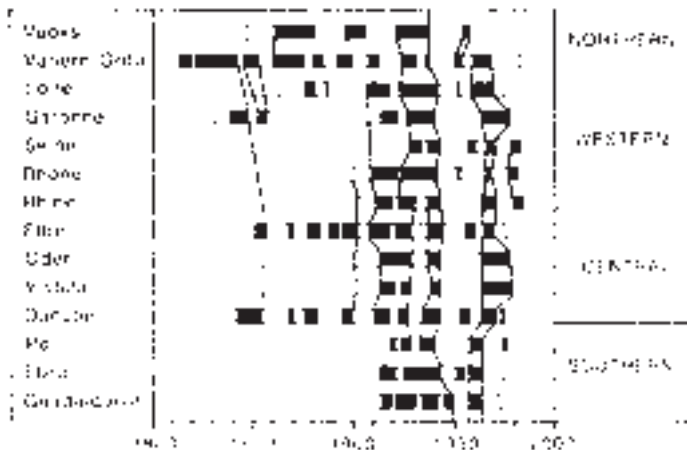


FIGURA 4. Períodos hidroclicmáticos medios para catorce ríos europeos, determinados mediante curvas de medias móviles para bandas de 5 años. Períodos representados en negro: descarga en exceso; períodos en blanco: descarga en déficit (ambas en relación con valores medios a largo plazo) (Probst, 1989).

El cambio climático actual, en gran medida inducido por la creciente concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (CO<sub>2</sub>, CFCs, óxido nitroso, metano —CH<sub>4</sub>—), puede tener también una notable incidencia sobre los ecosistemas naturales, la hidrología, las costas, la criosfera y los usos del suelo (PNUMA, 1992; Bautista Pérez, 1993). En el ámbito que nos ocupa, una subida del nivel del mar significaría inundaciones de zonas bajas costeras y estuarios, una brusca readaptación de los sistemas fluvio-deltaicos y fluvio-mareales, y cierto reajuste en el perfil de equilibrio de algunos ríos, con pendiente global o localmente alterada.

## CONCLUSIONES

Los estados de equilibrio constituyen en conjunto un período de redefinición (Schumm, 1977). En un proceso de reajuste dinámico del cauce a nuevas condiciones medioambientales, la inestabilidad es transitoria, pero también necesaria para alcanzar dichos estados. Tal adaptación no se produce de forma inmediata, requiere lustros e incluso décadas para ser completada. Por otra parte, la alteración puntual del sistema puede tener efectos importantes dentro de un contexto espacial más amplio. Los cambios originados aguas arriba influyen aguas abajo con un retardo temporal causa-efecto, especialmente en los tramos medio e inferior de los cursos fluviales. Con frecuencia, estos cursos atraviesan fases transitorias y se hallan sometidos a continuos cambios. Establecer si un río está ya ajustado o se está adaptando a nuevos controles, así como conocer la naturaleza y magnitud probable de una futura modificación del cauce, son aspectos de particular interés para los ingenieros y geógrafos encargados de planificar la actuación sobre este tipo de sistemas.

## REFERENCIAS

- ANDREWS, E.D. (1982): «Bank stability and channel width adjustment, East Fork River, Wyoming», *Water Resources Research*, 18, pp. 1184-1192.
- ANTONIO, R.A. (1969): «The Arkansas River Project civil engineering», *American Society of Civil Engineers*, 39 (12), pp. 44-49.
- BAUTISTA PÉREZ, M. (1993): «Cambio climático global», en *Medio Ambiente y Desarrollo. Antes y Después de Río-92*, Ciencia y Economía, Fundación Marcelino Botín, Santander, pp. 55-76.
- BAUMGARTEN, M. (1848): «Navigation fluviale, Garonne», *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents*, Paris, no. 197, 2, XVI, pp. 1-157.
- BOTÍA PANTOJA, A. (1992): «Problemática de las inundaciones con afecciones urbanas en la cuenca del Segura», en J. Dolz, M. Gómez y J.P. Martín (eds.), *Inundaciones y redes de drenaje urbano*, UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, pp. 361-378.
- BOUCHAGER, A. (1925): 1. «Le Drac dans la plaine de Grenoble, de 1280 à 1651», 2. «Le Drac et ses affluents», *Revue Géogr. Alpine*, 12, pp. 115-172 y 287-357.
- BRAVARD, J.P. y BETHEMONT, J. (1989): «Cartography of Rivers in France», en G.E. Petts, H. Möller y A.L. Roux (eds.), *Historical change of large alluvial rivers. Western Europe*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 95-112.

- BREUSERS, H.W.C. y RAUDKIVI, A.J. (1990): *Scouring*, Hydraulic Structures Design Manual, num. 2, A.A. Balkema, Rotterdam.
- CHANGMING, L. y DAKANG, Z. (1983): «Impact of south-to-north water transfer upon the natural environment», en A.K. Biswas, *Long-distance Water transfer*, Tycooly International, Dun Laoghaire, Ireland, pp. 169-180.
- CONESA GARCÍA, C. (1989): *La acción erosiva de las aguas superficiales del Campo de Cartagena*, Universidad de Murcia, CajaMurcia, pp. 110-113.
- CONESA GARCÍA, C. (1993): «Trazados de alta sinuosidad en ríos españoles», *Papeles de Geografía*, 18, pp. 9-30.
- CONESA GARCÍA, C., ALARCÓN, C., ESCUDERO, A.L., RUIZ, O. y SÁNCHEZ, L. (1993): «Impacto medioambiental de la presa del Azud de Ojós (curso medio del Segura)», en *Nuevos Procesos Territoriales. XIII Cong. Nac. de Geografía*, Sevilla, pp. 587-592.
- CONESA GARCÍA, C. (1994): «Torrential flows frequency and morphological adjustments of ephemeral channels in south-east Spain», en *Rivers*, E.J. Hickin (Ed.), John Wiley and Sons.
- CONESA GARCÍA, C. (1995): «Magnitud y frecuencia de sucesos hidromorfológicos del bajo Segura anteriores a su encauzamiento», *Papeles de Geografía* (Universidad de Murcia), 22, pp. 67-86.
- CONESA GARCÍA, C., LÓPEZ BERMÚDEZ, F., ALONSO SARRIÁ, F. y ÁLVAREZ ROGEL, Y. (1997): «Hydraulic and Morphological Effects on the Derivation Tagus-Segura Works on the Ephemeral Channels in the Rambla Salada Basin (South-East Spain)», *Fourth International Conference on Geomorphology*, Università di Bologna, Italy.
- CYBERNSKI, J. (1973): «Accumulation of debris in water storage reservoirs of Central Europe», en W.C. Ackermann, G.F. White y E.B. Worthington (Eds.), *Man-Mad Lakes: Their Problems and Environmental Effects*, Geophysical Monograph, 17, American Geophysical Union, Washington, pp. 359-63.
- FRICKEL, D.G. (1972): «Hydrology and the Effects of Conservation Structures, Willow Creek Basin, Valley Country, Montana, 1954-68», *US Geological Survey Water Supply Paper*, 1532-G, 35 pp.
- GARCÍA RUIZ, J.M. y PUIGDEFÁBREGAS, J. (1985): «Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del Pirineo Central», *Cuadernos de Investigación Geográfica*, vol. XI, 1-2, pp. 91-102.
- GILL, M.A. (1968): «River-bed degradation below dams», *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, HY2, pp. 593-595.
- GONZÁLEZ DEL TÁNAGO DEL RÍO, M. y GARCÍA DE JALÓN LASTRA, D. (1998): *Restauración de ríos y riberas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Fundación Conde del Valle de Salazar y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 319 p.
- HALES, Z.L.; SHINDALA, A. y DENSON, K.H. (1970): «Riverbed degradation prediction», *Water Resources Research*, 6, pp. 549-556.
- HOLLIS, G.E. y LUCKETT, J.K. (1976): «The response of natural river channels to urbanization: two case studies from south-east England», *Journal of Hydrology*, 30, pp. 351-363.

- HOWARD, A.D. y DOLAN, R. (1981): «Geomorphology of the Colorado River in the Grand Canyon», *Journal of Geology*, 89, pp. 269-98.
- LAURSEN, E.M., INCE, S. y POLLACK, J. (1975): «On sediment transport through the Grand Canyon», en *Proceedings of the Third Federal Interagency Sedimentation Conference, Denver, Colorado*, SED-COM-03, Water Resources Council, Washington, pp. 4-76 a 4-87.
- LEOPOLD, L.B. (1973): «River channel change with time: an example», *Bulletin of the Geological Society of America*, 84, pp. 1845-60.
- LEWIN, J., MACKLIN, M.G. y NEWSON, M.D. (1988): «Regime theory and environmental change - Irreconcilable concepts?», en *International Conference on River Regime*, W.R. White (Ed), Hydraulics Research, Wallingford, pp. 431-438.
- LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1986): «Evaluación de la erosión hídrica en las áreas receptoras de los embalses de la cuenca del Segura. Aplicación de la USLE», en *Estudios sobre geomorfología del Sur de España*, Univ. de Murcia, Univ. of Bristol y COMTAG (IGU), Murcia, pp. 93-98.
- MAKKAVEYEV, N.I. (1970): «The impact of large water engineering projects on geomorphic processes in stream valleys», *Geomorphologia*, 2, pp. 28-34.
- MENANTEAU, L. y VANNEY, J.-R. (1985): «El cauce del Bajo Guadalquivir: morfología, hidrología y evolución histórica», en *El Río: El Bajo Guadalquivir*, Ayuntamiento de Sevilla, Junta de Andalucía, pp. 116-136.
- MATEU BELLÉS, J. (1990): «Avenidas y riesgo de inundación en los sistemas fluviales mediterráneos de la Península Ibérica», *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 10, pp. 45-86.
- MARTÍN VIDE, J.P. (1997): *Ingeniería fluvial*, Politext, Area d'Enginyeria Civil. Ediciones UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 209 p.
- MARTÍN VIDE, J.P. y DEL AGUA RAZQUIN, J. (1992): «Erosión local en traviesas de protección de cauces», Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica. Escuela T.S. de Ing. de Caminos, C. y P., Barcelona.
- MARTÍN VIDE, J.P. y BLADE I CASTELLET, E. (1993): «Estudio de erosión fluvial y protección de un sifón bajo el Llobregat al pie de la presa del Canal de la Margen Derecha (Abastecimientos de St. Vicenç dels Horts)», Depto. de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, U.P.C., Barcelona, 52 p.
- MILLER, C.R. (1962): «Discussion of 'The Process of Channel Degradation' by E.R. Tinney», *Journal of Geophysical Research*, 67 (4), pp. 1481-3.
- MORISAWA, M. y LAFLURE, E. (1979): «Hydraulic geometry, stream equilibrium and urbanization», en *Adjustments of the Fluvial System*, D.D. Rhodes y G.P. Williams (Eds), Dubuque, Iowa, Kendall-Hunt, pp. 333-350.
- NOVAK, P., MOFFAT, A.I.B., NALLURI, C. y NARAYANAN, R. (1990): *Hydraulic Structures*. Unwin Hyman, London.
- OLLERO OJEDA, A. (1990): «Pendiente, sinuosidad y tipo de canal en el Ebro medio», *Cuadernos de Investigación Geográfica*, vol. XVI, 1-2, pp. 73-84.
- OYEBANDE, L. (1981): «Sediment transport and river basin management in Nigeria», en R. Lal y E.W. Rusell (Eds.), *Tropical Agricultural Hydrology: Watershed Management and Land Use*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 201-226.

- PARK, C.C. (1981): «Man, river systems and environmental impacts», *Progress in Physical Geography*, 5, pp. 1-31.
- PEIRY, J.L. (1988): *Approche géographique de la dynamique spatio-temporelle des sédiments dans un cours d'eau intra-montagnard: l'exemple de la plaine alluviale de l'Arve*, Unpublished Thesis. Department of Geography, University of Lyon 3, 350 pp.
- PETTS, G.E. (1978): *The adjustment of River Channel Capacity Downstream from Reservoirs in Great Britain*, Univ. of Southampton, UK, 279 pp.
- PETTS, G.E. (1980a): «Long-term consequences of upstream impoundment», *Environmental Conservation*, 7 (4), pp. 325-332.
- PETTS, G.E. (1980b): «Morphological changes of river channels consequent upon head-water impoundment», *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, 34 (4), pp. 374-382.
- PETTS, G.E. (1984): *Impounded Rivers. Perspectives for Ecological Management*, John Wiley and Sons, Chichester, pp. 117-147.
- PETTS, G.E. y PRATT, J.D. (1983): «Channel changes resulting from low-flow regulation on a lowland river, England», *Catena*, 10 (V2), pp. 77-85.
- PIERCE, R.S. HORNBECK, J.W., LIKENS, G.E. y BORMANN, F.H. (1973): «Effect of elimination on vegetation on stream water quantity and quality», en *Results of research on representative and experimental basins, IASH / UNESCO, Proceedings of the Wellington Symposium*, 1, pp. 311-328.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (1992). Brasil.
- POESEN, J.W.A. y HOOKE, J.M. (1997): «Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe», *Progress in Physical Geography*, 21, 2, pp. 157-199.
- PRATTS, J.D. (1983): «Channel Morphology and Bed-material Interactions within a Regulated River», *5th BGRG Postgraduate Symposium*, Huddersfield, UK, Mayo 1983.
- PROBST, J.L. y BAZERBACHI, A. (1986): «Solute and particulate transports by the upstream part of the Garonne river», *Sciences Géologiques Bulletin*, Strasbourg, 39, 1, pp. 79-98.
- PROBST, J.L. y TARDY, Y. (1987): «Long range streamflow and world continental runoff fluctuations since the beginning of this century». *Journal of Hydrology* (Elsevier, Amsterdam), 94, pp. 289-311.
- ROMERO DÍAZ, A., CABEZAS, F. y LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1992): «Erosion and Fluvial Sedimentation in the River Segura Basin (Spain)», *Catena*, vol. 9, no. 3-4, pp. 379-392.
- SCHUMM, S.A. (1969): «River metamorphosis», *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, HY1, pp. 255-273.
- SCHUMM, S.A. (1975): «Episodic erosion: A modification of the geomorphic cycle», en *Theories of Landform Development*, W.N. Melhorn y R.C. Flemal (Eds.), SUNY Binghamton, Publications in Geomorphology, pp. 299-309.
- SCHUMM, S.A. (1977): *The fluvial system*, Ed. John Wiley and Sons, New York, 338 pp.
- SOKOLOV, A.A.; RANTZ, S.E. y ROCHE, M. (1976): *Floodflow Computation Methods Compiled from World Literature*, UNESCO, Paris, 294 pp.

- VAN URK, G. y SMIT, H. (1989): «The Lower Rhine: Geomorphological Changes», en G.E. Petts, H. Möller y A.L. Roux (eds.), *Historical change of large alluvial rivers. Western Europe*. John Wiley & Sons, Chichester, pp. 167-182.
- WOLMAN, M.G. (1967): «two problems involving river channels and their background observations: quantitative geography part II», *Northwestern University Studies in Geography*, 14, pp. 67-107.
- YAKOVLEVA, L.V. (1965): «Characteristics of silting of small reservoirs of the Central Chernozem provinces and computation of density of botton deposits», en *Water Balance and Silting of Small Reservoirs in the Central Chernozem of the Russian Soviet Federal Socialist Republic* (trad. D.V. Krimgold), US Dept. of Agriculture Research Service, Washington, 1967.
- YANG, C.T. (1971): «On River Meanders», *Journal of Hydrology*, vol. 13, pp. 213-253.
- YANG, C.T. y SONG, C.S. (1982): Dynamic adjustments of alluvial channels», en *Adjustments of the Fluvial System*, D.D. Rhodes y G.P. Williams (Eds.), George Allen & Unwin, London, pp. 55-67.