

EFECTOS HIDROGEOMORFOLÓGICOS AGUAS ABAJO DE EMBALSES

En este artículo se expone una síntesis del estado del conocimiento sobre los efectos que tienen los embalses en el tramo fluvial aguas abajo de los mismos, en lo referente al régimen hidrológico, el transporte de sedimentos y la morfología del cauce.

Raúl López Alonso, Ing. Téc. de Obras Públicas, Ldo. en Geografía y DEA en Ingeniería Hidráulica. Dpto. de Ingeniería Agroforestal. Universitat de Lleida

Pere Pons Puy, Ingeniero Técnico Forestal ETS de Ingeniería Agraria. Universitat de Lleida

Ramón J. Batalla, Doctor en Geografía, Dpto. de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. Universitat de Lleida

1. INTRODUCCIÓN

La regulación fluvial a través de embalses y derivaciones ha sido motivada por diversos objetivos, entre otros, el control de avenidas, el abastecimiento de agua y la producción de energía eléctrica. Hace más de 5.000 años que se vienen construyendo presas, pero es a partir de la década de los 50 del siglo XX cuando se produjo un acusado incremento de la puesta es servicio de grandes presas. En Norteamérica y África más del 20% de la escorrentía fluvial se encuentra regulada y en Europa y Asia asciende al 15% (Knighton, 1998). En regiones de clima mediterráneo, la demanda y la disponibilidad de agua están desfasadas a lo largo del año: la precipitación se concentra principalmente en otoño, cuando el ciclo vegetal ya ha terminado y la demanda para riego (y para producción hidroeléctrica) es más baja. Por tanto, es



Embalse de Ribarroja (río Ebro)

necesario almacenar agua en ciclos multianuales para poder asegurar las distintas demandas. Como resultado los ríos en zonas mediterráneas acostumbran a estar mucho más regulados que ríos de dimensiones comparables en zonas húmedas (p. ej. la regulación del Ebro es del 60% de la escorrentía anual y la del Elba y el Rin no superan el 15%) (Batalla et al., 2003).

En tramos fluviales aguas abajo de embalses pueden producirse alteraciones sobre el régimen hidrológico, el transporte de sedimentos, la morfología fluvial, la vegetación, la fauna, la temperatura del agua y su composición química, etc. La magnitud de los efectos aguas arriba de los embalses, aunque variables en función de las características del aporte de sedimentos y de la presa, tienden a ser despreciables en comparación con la que muestran las consecuencias en el tramo aguas abajo. Dado que un gran número de presas se construyeron durante el siglo XX y que la escala temporal de ajuste geomorfológico puede ser muy larga, es posible que transcurra un siglo o más antes de que los efectos se completen, especialmente en los tramos más lejanos de las presas.

El objetivo de este artículo es exponer una síntesis del estado del conocimiento acerca de los efectos que tienen los embalses en el tramo fluvial aguas abajo de los mismos, en lo referente al régimen hidrológico, el transporte de sedimentos y la morfología del cauce.

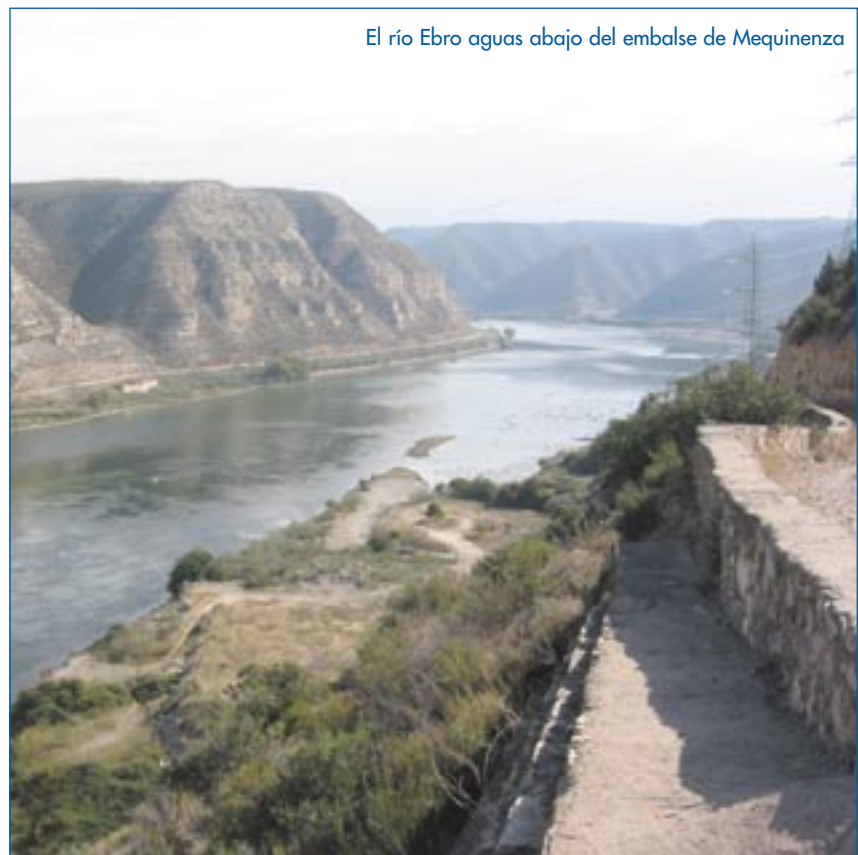
2. EFECTOS SOBRE EL RÉGIMEN HIDROLÓGICO

Si bien el propósito general de una presa es almacenar agua con la capacidad de descargarla de forma controlada, el régimen de desem-

balsado específico es función del objetivo que cumple el embalse. En este sentido, existen presas que interrumpen la corriente de agua en una determinada sección de forma completa o casi completa, y que únicamente el drenaje a través de la presa, el drenaje subterráneo y la aportación de tributarios conforman la aportación aguas abajo. En otros casos, como el de las presas asociadas a una central hidroeléctrica, pueden desaguar elevados caudales concentrados en un periodo del día, mientras que el resto del tiempo el flujo se reduce de forma considerable o total. En algunas presas destinadas al abastecimiento de agua para riego mientras que durante la época del año destinada a tal uso derivan la práctica totalidad del flujo, el resto del año no alteran prácticamente el régimen hidrológico natural. Por el contrario, si los canales de derivación

para riego parten de diferentes secciones aguas abajo de la presa, durante la época que no se riega se almacena el agua en el embalse y se libera en la época de riego.

A pesar de esta variedad de patrones en lo referente al régimen de desembalse, lo que es prácticamente seguro es que éste difiere del régimen natural previo, aunque resulta difícil generalizar de forma más precisa. Por ejemplo, Williams y Wolman (1984) hallaron que para un conjunto de 29 presas del centro y oeste de los EUA el promedio del caudal máximo anual disminuyó después de su construcción entre un 3% y un 91%. Sin embargo, aunque el caudal medio diario aguas abajo se alteró para la mayoría de los casos, no lo hizo en el mismo sentido, ya que en algunos casos disminuyó y en otros aumentó. Asimismo, hallaron modificaciones en los caudales bajos (defi-



El río Ebro aguas abajo del embalse de Mequinenza

nidos como aquellos que eran igualados o superados el 95% del tiempo) pero también con diferencias en el sentido del cambio.

Otros autores han observado también un marcado efecto sobre los caudales máximos anuales. Ligon et al. (1995) constataron que con motivo de la construcción de dos presas (Cougar y Blue River) en el río McKenzie (Oregon, EUA) se redujo el caudal punta anual medio en un 55% (figura 1). La regulación del río Fortun (Noruega) desde 1963 supuso una disminución del caudal medio anual en un 65% y del valor medio de la punta de caudal de la avenida máxima anual en un 36% (Fergus, 1997).

Chien (1985) confirmó una laminación considerable de los hidrogramas de crecida de gran periodo de retorno causada por el embalse de Sanmeixa en el río Amarillo (China), con reducciones de hasta el 60% del caudal punta. Por el contrario, el caudal medio diario registró un incremento en su magnitud, ya que, por ejemplo, si en condiciones previas al embalse dicho caudal se encontraba comprendido entre 1.000 y 3.000 m³/s durante una media de 130 días al año con posterioridad lo hacía 204 días. La puesta en servicio en 1942 de la presa Fort Peck en el río Missouri (EUA) ha supuesto una disminución en la magnitud del caudal máximo de las avenidas, un incremento de la magnitud de los caudales más bajos y una redistribución de las crecidas primaverales y del inicio del verano hacia los meses de invierno (Simon et al., 2002). Batalla et al. (2003) han constatado una reducción del caudal máximo anual entre el 30% y el 40% para la mayoría de ríos de la cuenca del Ebro. Esta disminución está directamente relacionada con el nivel de almacenaje de los embalses

con respecto a la escorrentía media anual.

Los embalses destinados a la generación de energía hidroeléctrica pueden alterar significativamente el régimen diario de caudal respecto a las condiciones previas, estableciendo un patrón mucho más regular durante el año (p. ej. Ibañez et al., 1996). En algunos casos, el caudal pico desaguado en las horas punta de producción eléctrica (varias horas a lo largo del día) puede llegar a alcanzar una magnitud del orden del de la avenida anual máxima que tenía lugar de forma natural (Hirsch et al., 1990).

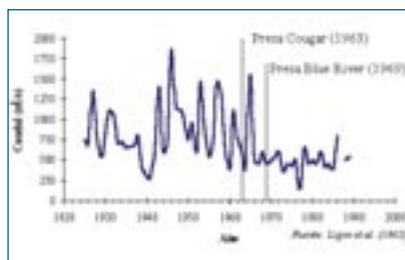


Figura 1. Evolución del caudal máximo anual en el río McKenzie (Oregón, EUA) durante el periodo 1923-1989

3. EFECTOS SOBRE LA CARGA DE SEDIMENTOS

Las mediciones más adecuadas a la hora de valorar la capacidad de retención de sedimentos de una presa son las realizadas en secciones próximas aguas abajo de la misma, con el fin de evitar los aportes de carga sólida de tributarios o la carga de sedimento con origen en el lecho del tramo inmediatamente inferior a la presa. Los registros realizados tomando estas precauciones en la ubicación arrojan resultados de eficacia de retención en grandes presas que superan el 99% (p. ej. Williams y Wolman, 1984; Al-Taiee, 1990; Ibañez et al., 1996; Vericat y Batalla, 2003).

Un ejemplo ilustrativo y bien docu-

mentado de la capacidad de retención de sedimentos que muestran algunos embalses es el caso de la presa Hoover en el río Colorado (EUA) (Williams y Wolman, 1984; Meade y Parker, 1985). En la figura 2 se muestra la evolución de la carga de sedimentos en suspensión en dos estaciones de aforo, una situada aguas arriba y otra aguas abajo de la presa Hoover. Previamente a la construcción del embalse los registros de ambas estaciones presentaban un comportamiento análogo, caracterizado por una importante fluctuación. Por el contrario, posteriormente la estación ubicada aguas abajo difiere del patrón anterior, registrado una carga de sedimentos en suspensión mucho más reducida y con tendencia decreciente sin oscilaciones. El caudal anual de sedimentos en suspensión promedio hasta 1935, año de cierre de la presa, era de 130 Mt, mientras que en el periodo posterior no alcanzaba 0,1 Mt.

La carga de sedimentos anual en el tramo del río Ebro aguas abajo del sistema de embalses Mequinenza-Ribarroja se redujo aproximadamente un 99% después de su construcción (Ibañez et al., 1996; Avendaño et al., 2000). La reducción en la carga anual de sedimentos desde 817 Mt hasta 205 Mt provocada por las grandes presas de los ríos Missouri y Mississippi es el factor de mayor contribución a la rápida tasa de recesión de la costa de Louisiana (EUA) (Keown, et al., 1986).

La distancia aguas abajo del embalse que debe recorrer el flujo para recuperar la carga de transporte sólido o el nivel de concentración de sedimentos previo a la construcción de la presa depende del nuevo régimen hidrológico impuesto, de la disponibilidad de sedimentos en el cauce y de los

aportes de caudal líquido y sólido de los diferentes tributarios. En algunos casos la recuperación sólo es posible después de que el flujo recorra distancias entre 200 y 500 km. En otros, las modificaciones introducidas por el embalse y las condiciones hidrogeomorfológicas del tramo inferior son tales que la concentración o carga previa de sedimentos no se recupera. Este es el caso del río Missouri (EUA), en el que se construyeron tres grandes presas en los años 1952 y 1955. La carga de sedimentos en suspensión ocho kilómetros aguas abajo de la última presa era inferior al 1% de la carga en condiciones naturales y 1.200 km aguas abajo alcanzaba únicamente el 30% del nivel previo (Williams y Wolman, 1984).

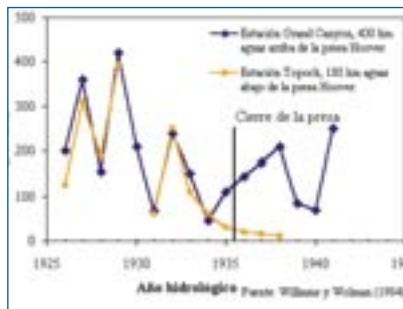


Figura 2. Efecto de la construcción de la presa Hoover (río Colorado, EUA) en la carga anual de sedimentos en suspensión

4. EFECTOS SOBRE LA MORFOLOGÍA FLUVIAL

La dirección y magnitud de los efectos geomorfológicos sobre el cauce se producen sobre la base del ajuste al nuevo régimen hidrológico y de aporte de sedimentos resultante de la construcción de la presa y de la resistencia del material del lecho aguas abajo.

4.1.- Cambios en la elevación del lecho

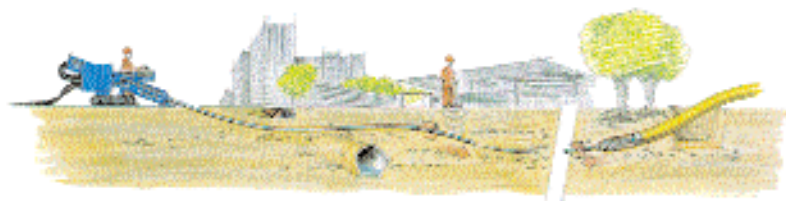
Una de las respuestas más comunes del cauce aguas abajo de la presa es la incisión (degradación) del lecho a un ritmo muy superior al régimen natural durante un periodo de varios años con posterioridad a la construcción y que se extiende varios kilómetros (p. ej. Galay, 1983; Chien, 1985; Ligon et al., 1995; Jiongxin, 1996; Simon et al., 2002). Se explicaría fundamentalmente porque la baja concentración de sólidos que muestra el flujo desembalsado (denominado flujo de agua clara) provoca que éste tienda a satisfacer su capacidad de transporte de sedimento en el tramo inmediatamente aguas abajo de la presa mediante la erosión del lecho y los márgenes. El proceso de degradación



SOLUCIONES EFICACES A TRABAJOS ESPECIALES



- PERFORACIÓN HORIZONTAL Y DIRIGIDA
- PERFORACIÓN EN ROCA
- ENTERRADORAS DE CABLES Y TUBERIAS
- ZANJADORAS DE SECCIÓN REDUCIDA
- HINCAS VERTICALES Y HORIZONTALES
- CHIMENEAS DE VENTILACIÓN EN ROCA
- COLOCACIÓN DE CANALETAS PREFABRICADAS



APLICACIONES ESPECIALES DE INGENIERÍA CIVIL, S.A.
PERFORACIONES ESPECIALES Y DIRIGIDAS, S.L.

C/ Merindad de Montija, 18 - Nave 9 A.
Polígono Industrial Vikiñenquijar
Aptdo 547. 09001 BURGOS
Tel.: 947 298 605 Fax: 947 298 615
E-mail: comercial@aples.net

Más información en nuestra web www.aples.net

se va atenuando a medida que se alcanza un equilibrio morfológico, por ejemplo, a través de la disminución de la pendiente longitudinal del cauce y del incremento de la rugosidad lo que a su vez conlleva la incapacidad del flujo para erosionar el material. Los índices iniciales de degradación del lecho tienden a ser muy elevados, alcanzándose la mayor parte de la erosión durante el 10-15% del periodo total de ajuste, que puede alargarse hasta más de un siglo.

Diversos fenómenos pueden detener el proceso degradatorio del lecho, como la formación de una coraza superficial de material grueso, no erosionable por el flujo y que protege al material subyacente. La incisión debida a la erosión también puede mostrarse de forma muy irregular como consecuencia de la discontinuidad del régimen de desagües de la presa, del cambio en la forma de la sección transversal del cauce, del desarrollo, muerte o erradicación de la vegetación o de la secuencia de capas sedimentarias del lecho (Williams y Wolman, 1984). Por ejemplo, en el río Hanjiang (China) la tasa de incisión en la capa superficial de arena se vio bruscamente interrumpida cuando la acción erosiva descubrió una capa inferior de grava (Jiongxin, 1996).

En ocasiones, sin embargo, no se produce una degradación del lecho sino que se detecta un aumento de la elevación del mismo (agradación) como han puesto de manifiesto diversos estudios (p. ej. Bray y Kellerhalls, 1979; Allen et al., 1989; Fergus, 1997). Lo anterior se produciría cuando la perturbación del régimen hidrológico significara una merma tal de la capacidad de transporte de sedimentos del flujo que, a pesar del fenómeno de agua clara, la corriente no pudiera ero-

sionar el lecho del río ni transportar los aportes sólidos de los diferentes tributarios lo que daría lugar a su deposición.

El análisis de la variación del nivel del lecho con la distancia aguas abajo de la presa, es decir la modificación del perfil longitudinal, muestra que la máxima erosión se produce en un tramo próximo a la presa, apreciándose una disminución progresiva de la degradación a medida que el flujo se aleja de la misma. Por consiguiente, el perfil longitudinal pone de manifiesto una disminución de la pendiente. Esta tendencia puede cambiar debido al diferente grado de erosionabilidad de los materiales a lo largo del río. Williams y Wolman (1984) analizaron la variación en el perfil longitudinal del río aguas abajo de 14 presas de los EUA, encontrado que en 12 casos la sección de mayor erosión se encontraba inmediatamente aguas abajo de la presa o, bien, en una sección próxima respecto al total de longitud afectada. La progresión de la erosión aguas abajo del embalse puede inducir la progresión aguas arriba de la degradación en el lecho de los cauces tributarios, motivada por la disminución del nivel de base de éstos, lo que a su vez puede provocar un incremento de la carga sólida en el cauce principal y la subsiguiente ralentización del proceso de incisión (Germanoski y Ritter, 1988).

4.2.- Cambios en la sección transversal del cauce

El principal parámetro de análisis que habitualmente se ha escogido para detectar cambios en la sección transversal del cauce ha sido el ancho del cauce principal. Diversos estudios han constatado que la modificación en el ancho del cauce puede manifestarse a través del aumento, la disminu-

ción o la ausencia de alteración, con más de una posibilidad cuando se analiza su evolución temporal. En un extenso estudio en ríos regulados, Williams y Wolman (1984) encontraron una gran variedad de respuestas en el ajuste del ancho, que incluían ensanchamientos (46%), estrechamientos (26%) y la no alteración (22%).

El ensanchamiento de la sección transversal puede atribuirse a algunos de los siguientes factores: la baja concentración de carga sólida aguas abajo debida a la capacidad de retención de la presa, lo que incrementaría la erosión sobre lecho y márgenes (fenómeno de aguas claras) o únicamente sobre las márgenes si el material del lecho fuera menos erosionable; la disminución de los sedimentos depositados en las márgenes o en sus proximidades, motivada por la reducción de carga sólida y de caudales punta; las fluctuaciones diarias de caudales, que en tramos aguas abajo de presas hidroeléctricas producen la humectación continua de las márgenes y una mayor erosionabilidad de las mismas; la socavación de las márgenes motivada por la evolución de la incisión en el lecho (Williams y Wolman, 1984).

Chien (1985) halló que el ensanchamiento del cauce en el tramo aguas abajo del embalse de Quanting en el río Yong-ding (China) evolucionó rápidamente en los años inmediatamente posteriores a la construcción de la presa y tendió a estabilizarse progresivamente con el paso del tiempo. Harrison y Mellema (1982) también describieron el mismo fenómeno a partir de los estudios realizados en el río Missouri (EUA) después de la construcción de seis embalses en la cabecera de cuenca.

El estrechamiento de la sección suele asociarse a situaciones en las que la disminución del caudal del río regulado es superior al que sufre el aporte de sedimentos, por lo que predominarán procesos de sedimentación. Cuando esta sedimentación se produce en forma de barras laterales, con propensión a localizarse aguas abajo de la confluencia con tributarios no regulados, la sección tiende a estrecharse. La reducción en la capacidad de movilización del sedimento por el flujo puede intensificar el establecimiento de vegetación riparia ayudando a la estabilización de las barras, isletas y márgenes, lo que redundará en el estrechamiento del cauce. Desde la construcción en 1967 de una presa de derivación de caudales para producción hidroeléctrica en el río Snowy (Australia) los depósitos formados con aportes sólidos de los tributarios, estabilizados

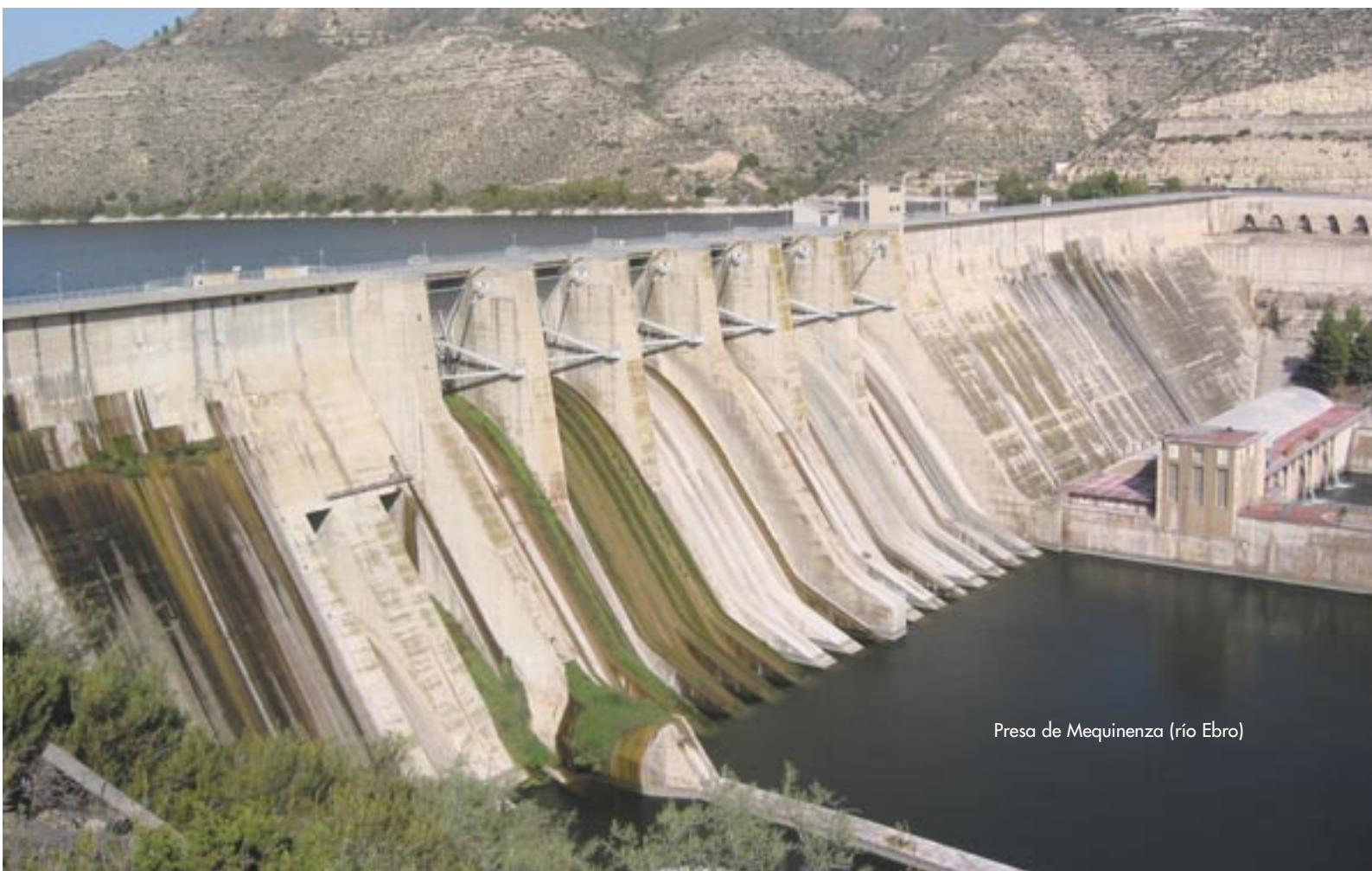
por el crecimiento de vegetación, han provocado el estrechamiento del cauce hasta 320 km aguas abajo (Erskine et al., 1999). En el río Platte, donde el caudal máximo anual y el caudal medio se redujeron hasta un 30% respecto al nivel previo a la presa, el ancho del cauce se redujo en un porcentaje equivalente en un periodo entre 40 y 60 años (Williams, 1978). Desde la construcción de las presas de Mequinenza y Ribarroja en el tramo bajo del río Ebro la anchura del cauce activo ha disminuido un 20% (Vericat y Batalla, 2003).

En situaciones en las que no existe aporte de los tributarios aguas abajo de la presa y el flujo desembalsado no tiene la capacidad tractiva suficiente para erosionar el lecho ni las márgenes, la morfología del cauce permanece inalterada.

5.- CONCLUSIONES

Los efectos hidrológicos de los embalses sobre el tramo de río situado aguas abajo dependerán del régimen de desembalse específico. Sin embargo, en general, se aprecia una disminución en la magnitud y frecuencia de las crecidas extraordinarias y en el valor medio del caudal máximo anual, cambios en la variación estacional del caudal y, en el caso de las presas destinadas a producción hidroeléctrica, un patrón anual regular y una gran fluctuación diaria.

Salvo excepciones las presas impiden totalmente el transporte de sedimentos de fondo hacia aguas abajo y prácticamente anulan el de suspensión. La distancia que debe recorrer el flujo hacia aguas abajo para recuperar el nivel de carga o de concentración sólida puede ser del orden de centenares de kiló-



Presa de Mequinenza (río Ebro)

metros y en algunos casos no llega a recuperarse.

Los efectos sobre la forma del cauce dependerán del nuevo régimen hidrológico y de aporte de sedimentos resultante de la construcción de la presa y de la resistencia del material del lecho aguas abajo. Por consiguiente, las diversas investigaciones constatan tanto degradación del lecho (decreciente aguas abajo), agradaciones (por aporte de tributarios o redistribución del material preexistente), así como incremento del ancho del cauce principal, estrechamiento o ausencia de alteración.

REFERENCIAS

- ALLEN, P.M.; HOBBS, R.; MAIER, N.D. (1989): "Downstream impacts of a dam on a bedrock fluvial system, Brazos River, central Texas". *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*. 26: 165-189.
- AL-TAIEE, T.M. (1990): "The influence of a dam on the downstream degradation of a riverbed: case study of the Tigris River". *SIN-NIGER, R.O.; MONBARON, M. (Ed.): Hydrology in mountainous regions II. Artificial reservoirs, water and slopes. IAHS, Wallingford*. 3-10.
- AVENDAÑO, C.; SANZ, M.E.; COBO, R. (2000): "Embalses en el río Ebro: su influencia en la morfología del cauce y en los sólidos aportados al Delta". *Actas de las V Jornadas sobre encauzamientos fluviales. Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid*.
- BATALLA, R.J.; KONDOLF, G.M.; GOMEZ, C.M (2003): "Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain)". *Journal of Hydrology* (en prensa).
- BRAY, D.I.; KELLERHALLS, R. (1979): "Some Canadian examples of the response of rivers to man-made changes". *RHODES, D.D.; WILLIAMS, G.P. (Ed.): Adjustments of the fluvials system. George Allen and Unwin. Londres*. 351:372.
- CHIEN, N. (1985): "Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs". *Earth Surface Processes and Landforms*. 10: 143-159.
- ERSKINE, W.D.; TERRAZZOLO, N.; WARNER, R.F. (1999): "River rehabilitation from the hydrogeomorphic impacts of a large hydroelectric power project: Snowy river, Australia". *Regulated Rivers: Research & Management*. 15: 3-24.
- FERGUS, T. (1997): "Geomorphological response of a river regulated for hydropower: river Fortun, Norway". *Regulated Rivers: Research & Management*. 13: 449-461.
- GALAY, V.J. (1983): "Causes of river bed degradation". *Water Resources Research*. 19: 1057-1090.
- GERMANOSKI, D.; RITTER, D.F. (1988): "Tributari response to local base level lowering below a dam". *Regulated Rivers: Research & Management*. 2: 11-24.
- HARRISON, A.S.; MELLEMA, W.J. (1982): "Sedimentation aspects of the Missouri River dams". *Proc. 14th Cong. Inter. Comm. on Large Dams, Brazil*.
- HIRSCH, R.M.; WALKER, J.F.; DAY, J.C.; KALLIO, R. (1990): "The influence of man on hydrologic systems". *WOLMAN, M.G.; RIGGS, H.C. (Ed.): Surface Water hydrology. GSA, Colorado*. 329-359.
- IBAÑEZ, C.; PRAT, N.; CANICIO, A. (1996): "Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro river and its estuary". *Regulated Rivers: Research & Management*. 12: 51-62.
- JIONGXIN, X. (1996): "Underlying gravel layers in a large sand bed river and their influence on downstream-dam channel adjustment". *Geomorphology*. 17(4):351-360.
- KEOWN, M. P.; DARDEAU, E. A.; CAUSEY, E. M. (1986): "Historic trends in the sediment flow regime of the Mississippi River: Water Resources Research". 22:1555-1564.
- KNIGHTON, D. (1998): "Fluvial forms and processes". *Edward Arnold*.
- LIGON, F. K., DIETRICH, W. E.; TRUSH, W. J. (1995): "Downstream ecological effects of dams". *Bioscience*. 45 (3): 183-192.
- MEADE, R.H.; PARKER, R.S. (1985): "Sediment in rivers of United States". *National Water Summary 1984. US Geological Survey Water-Supply Paper*. 2275: 49-60.
- SIMON, A.; THOMAS, R.E.; CURINI, A.; SHIELDS, F.D. (2002): "Case Study: Channel Stability of the Missouri River, Eastern Montana". *Journal of Hydraulic Engineering*. 128, 10:880-890.
- VERICAT, D.; BATALLA, R.J. (2003): "Efectos de las presas en la dinámica fluvial del curso bajo del río Ebro". *Cuaternario y Geomorfo-logía* (en prensa).
- VERICAT, D.; BATALLA, R.J. (2003): "Sediment transport in a highly regulated fluvial system during two consecutive floods (lower Ebro River, NE Spain)". *Geomorphology* (en revisión).
- WILLIAMS, G. P.; WOLMAN, M.G. (1984): "Downstream effects of dams on alluvial rivers. USDI Geol. Surv. Prof. Pap. 1286:1-64.
- WILLIAMS, G. P. (1978): "The case of the shrinking channels-the Platte and Platte rivers in Nebraska". *US Geological Survey Circular*. 781.
- WOHL, E. (2000): "Mountain rivers". *Water Resources Monograph*. 14. American Geophysical Union. ■