

Riesgos hidrológicos

Gerardo Benito Ferrandez

Resumen

Las inundaciones catastróficas ocurridas en España durante la segunda mitad de los años 90 han puesto de manifiesto la necesidad de disponer de datos hidrológicos sobre crecidas dentro de un marco temporal más amplio del que ofrecen los datos disponibles en las estaciones de aforo. Las técnicas paleohidrológicas de reconstrucción de paleocrecidas ofrecen información sobre la variabilidad hidrológica de las avenidas extraordinarias para periodos que pueden oscilar entre 100 y 10.000 años. En el presente trabajo se exponen los avances y las nuevas técnicas paleohidrológicas para la reconstrucción del registro de paleocrecidas de gran magnitud. En esta reconstrucción se utilizará el registro estratigráfico y geomorfológico de los depósitos de inundación (arenas y limos) y la información de avenidas históricas. Los cálculos hidráulicos de las paleocrecidas se realizan utilizando el modelo HEC-2, tomando como indicadores de elevación mínima del agua durante el caudal punta la altura de los depósitos de avenida a lo largo de un tramo fluvial, así como las referencias históricas existentes. El análisis de la frecuencia de inundaciones ($T=100, 500, 1000$ y 5000 años) se realiza mediante la combinación de datos instrumentales, crecidas históricas y paleocrecidas utilizando métodos existentes de ajuste de funciones de distribución, como por ejemplo los algoritmos de Máxima Verosimilitud. La determinación de los caudales asociados a crecidas con largos periodos de retorno presenta una aplicación inmediata al análisis de riesgos y la seguridad de presas.

Palabras clave: Riesgos hidrológicos, inundaciones, paleocrecidas, análisis de frecuencia

Introducción

En última década del siglo XX se produjeron una serie de inundaciones de gran impacto social, no tanto por los daños económicos que se producen sino por la cantidad de víctimas que ocasionan. Algunos ejemplos recientes son las avenidas de Yebra-Almoguera en Guadalajara (1995, 10 muertos), Biescas en los Pirineos (1996; 87 muertos), Alicante (1997; 5 muertos y €65 millones de pérdidas) y Badajoz (24 muertos y €250 millones de pérdidas). La mayor parte de los informes técnicos elaborados por la administración señalan que se trata de

fenómenos naturales únicos y de carácter imprevisible. Estas afirmaciones se basan en la falta de datos de inundaciones de similar magnitud en los registros hidrológicos que se miden en las estaciones de aforo, aquellos que se utilizan para planificar las zonas inundables y los riesgos potenciales de inundación.

De estas catástrofes se extraen las siguientes conclusiones: a) los eventos extraordinarios responden a periodicidades que escapan a las series cortas registradas en las estaciones de aforos; b) la experiencia humana nos muestra que los daños e impactos de las avenidas pueden ser mitigados o aliviados, pero nunca pueden ser completamente eliminados; c) las actuaciones estructurales sobre los cauces y los sistemas de alerta en tiempo real proporcionan una sensación de seguridad en la sociedad que en la práctica resulta ser totalmente erróneo; d) determinadas medidas estructurales como canalización de los cauces, construcción de presas de retención de sedimentos, etc. pueden magnificar los daños de las inundaciones cuando se sobrepasa la capacidad para la cual han sido diseñados, se rompen las estructuras o existen errores en las operaciones o en los equipos; e) la valoración del riesgo de avenidas y la elección de medidas a implementar requiere la incorporación de estudios que aporten nuevos criterios en la evaluación y prevención de los riesgos de inundaciones extraordinarias.

En general, se puede decir que existe un desconocimiento de esos eventos extremos y que abordar la planificación de los riesgos de inundaciones como un problema estadístico de datos hidrológicos puede conducir a importantes daños materiales y de vidas humanas (Baker, 1994). Los eventos extraordinarios responden a ciclicidades que escapan a los registros hidrológicos convencionales, por lo que se requiere de metodologías que aborden el análisis de avenidas ocurridas en el pasado. Estas inundaciones pasadas constituyen la mejor evidencia de la probabilidad de que un determinado evento pueda repetirse en el futuro, teniendo en cuenta todos los posibles escenarios tanto hidrológicos como climáticos (Baker, 1994). Los estudios geomorfológicos y paleohidrológicos presentan las herramientas y las metodologías necesarias para el cálculo de caudales de avenidas excepcionales de gran magnitud. Sin duda, estos datos permiten un conocimiento más realista del sistema natural, que resulta esencial para la determinación de los riesgos

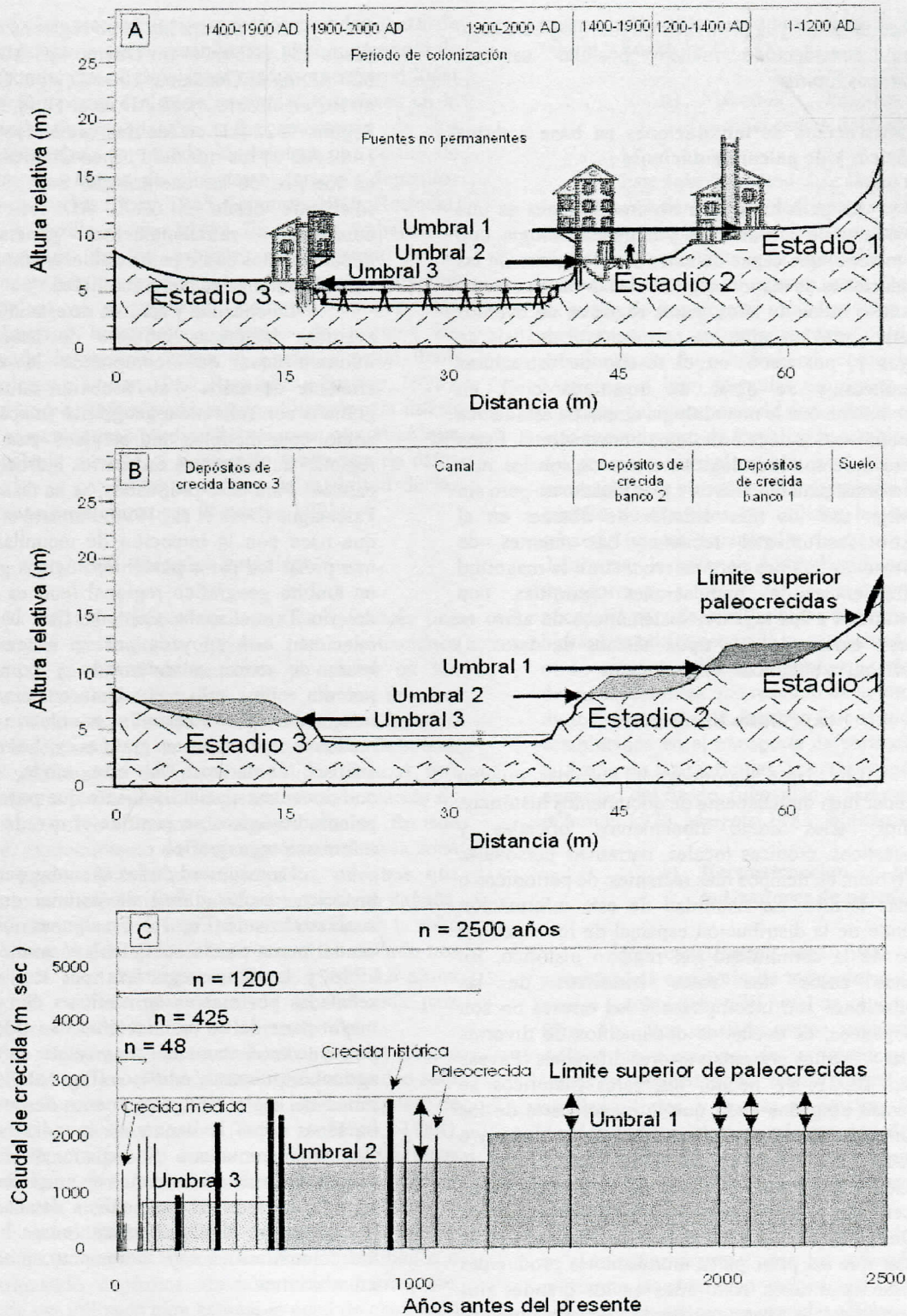


Figura 1 A. Diagrama esquemático ilustrando el cambio de nivel de percepción a través del tiempo de acuerdo a la progresiva ocupación humana de las zonas próximas a los ríos. Esto significa que el umbral de los caudales de crecida registrados en documentos históricos decrecen en el tiempo. B Superficies geomorfológicas cubiertas con depósitos de crecida, mostrando distintos umbrales de caudal de crecida. C Organización de los datos sistemáticos, históricos y de paleocrecidas, utilizando los umbrales de caudal descritos en los apartados anteriores, para su utilización en el análisis de frecuencia de inundaciones.

de inundaciones y la planificación hidrológica a largo plazo, considerando incluso posibles cambios climáticos futuros.

Reconstrucción de inundaciones en base a datos históricos y de paleoinundaciones

La paleohidrología de inundaciones es una nueva rama de la hidrología y la geomorfología, con una metodología capaz de extender el registro de las inundaciones de mayor magnitud hasta varios cientos e incluso miles de años. Estos registros de eventos extremos pueden aplicarse con éxito al análisis de riesgos y, por tanto, en el diseño de estructuras hidráulicas y de obras de ingeniería civil, en combinación con la metodología empírica, estadística y determinística de la hidrología convencional. Estos acontecimientos hidrológicos extremos son los más interesantes para ingenieros y planificadores, pero sin embargo son los más difíciles de obtener en el registro instrumental reciente. Las fuentes de información que nos permite reconstruir la magnitud y frecuencia de inundaciones ocurridas con anterioridad a los registros sistemáticos de aforo es diversa, existiendo tres tipos básicos de datos: a) históricos, b) botánicos, c) geológicos.

a) Datos históricos

Los datos históricos de avenidas pueden proceder bien directamente de documentos históricos escritos, tales como documentos oficiales y eclesiásticos, crónicas locales, narrativas personales etc., o bien, en tiempos más recientes, de periódicos o gacetas locales. La fiabilidad de esta información depende de la distribución espacial de los datos así como de la continuidad del registro histórico. En muchos casos, los datos históricos de las inundaciones son incompletos y los errores no son homogéneos, es decir, los documentos de diversas épocas y fuentes presentan errores diferentes (Pavese et al., 1992). De hecho, los datos históricos se presentan sesgados dado que la mayor parte de los documentos escritos se refieren a zonas pobladas y/o ciudades. No obstante, conviene resaltar que la población en España a través de la historia se ha concentrado principalmente a lo largo de los tramos medios y bajos de los principales ríos. Por tanto, es de esperar que las principales inundaciones producidas durante los últimos 1000 años en los grandes ríos peninsulares se han registrado en documentos oficiales y eclesiásticos de estas ciudades.

En España, existen diversos trabajos recopilatorios de inundaciones históricas como los realizados por Masachs (1948), Fontana Tarrats (1977), Font (1988), Canales (1989) y la Comisión Técnica de Inundaciones (1985). La información disponible sobre avenidas históricas (Benito et al.,

1997 y 1997) supera los 2500 registros comenzando desde 181 BC en el río Duero, 449 AD en el Tajo, 620 AD en el Guadiana, 100 AD en el Guadalquivir, 49 BC en el Ebro, 1088 AD en el Turia, 934 AD en el Segura, 1522 AD en los ríos cantábricos y gallegos, 1489 AD en los ríos del Pirineo Oriental, y 1544 AD en los ríos de las cuencas del Sur. Sin embargo, solamente desde el 1400 AD los registros se consideran suficientemente generalizados y documentados como para establecer comparaciones y consideraciones de cierta fiabilidad.

La consulta y análisis de esta información de avenidas históricas requiere de bases de datos informatizadas que comprenda la organización eficiente de datos y su conexión tanto con datos gráficos con referencia geográfica (mapas temáticos) como con modelos hidrológicos para el análisis regional de diferentes escenarios hidroclimáticos del pasado. Para tales propósitos, se ha diseñado la base Paleotagus (Diez et al., 1998, Fernández et al., 1998) que nace con la intención de recopilar, analizar e interpretar los datos paleohidrológicos generados en un ámbito geográfico regional (cuenca hidrográfica del río Tajo, España Central). Esta base de datos relacional está apoyada por un sistema gestor de bases de datos estandarizado y compatible que permite, no sólo el almacenamiento de la información, sino su estudio cuantitativo y cualitativo mediante aplicaciones gráficas y herramientas de análisis numérico. De este modo, y dada la componente espacial intrínseca que poseen los datos paleohidrológicos se justifica el uso de sistemas de información geográfica.

La magnitud de las avenidas para el registro histórico resulta difícil de estimar cuantitativa o cualitativamente (Fig. 1a). En algunas poblaciones, el caudal punta puede ser calculado usando curvas de aforo y la altura registrada por las inundaciones señaladas por marcas en edificios. Sin embargo, la mayor parte de las inundaciones han sido registradas por exceder el cauce del río y causar daños en zonas agrícolas, puentes y edificios (Fig. 1a). En la segunda mitad del siglo XIX, el aumento de las actividades humanas sobre la llanura de inundación determinó que se incrementara el registro de inundaciones responsables de causar daños en propiedades. En este sentido, se requiere un análisis detallado de estos registros para distinguir entre causas humanas y/o hidroclimáticas en este incremento en el número de inundaciones.

b) Reconstrucción basada en el tipo de régimen

Este tipo de reconstrucciones se basan en las características de la red de drenaje, tales como la densidad de drenaje, las características del canal, o en el modelado fluvial como las terrazas (Salas et al.,

1994). Las reconstrucciones más extendidas dentro de esta categoría están encaminadas al conocimiento de las condiciones hidrológicas medias que dieron lugar a la formación de los paleocanales existentes en la llanura de inundación. La geometría de los paleocanales se puede determinar a partir de fotografías aéreas, documentos históricos y depósitos sedimentarios (Dury, 1965; Schumm, 1968; Rotnicki, 1991; Pinilla et al., 1995). En dichos trabajos, la estimación de los caudales se obtienen de la comparación de estos canales con sistemas fluviales actuales y, en general, permiten conocer los parámetros hidrológicos propios de eventos de elevada frecuencia, como el caudal a canal lleno (Wolman y Miller, 1960; Reinfelds y Bishop, 1998). Este tipo de información puede utilizarse para inferir las características medias del régimen climático que prevalecía durante el tiempo de formación de estos canales y, por lo tanto, estimar la magnitud de las fluctuaciones climáticas (Rotnicki, 1991).

c) Métodos botánicos

Estos métodos se basan en reconocer una serie de indicadores dejados por inundaciones pasadas en forma de impactos o huellas en los troncos, anomalías en los anillos de los árboles, distribución espacial de la vegetación por edades, o crecimiento o brote de retoños, etc. Resulta frecuente que el impacto del material sólido (debris) que transporta la inundación deje una serie de marcas de impacto sobre el tronco de algunos árboles. En este caso, el crecimiento del tronco se paraliza en la zona con tejido afectada por el impacto, mientras que continúa el crecimiento anual en la parte no dañada. De esta manera, una sección o perforación en la zona de contacto del tejido dañado con el no dañado nos revela la edad del impacto (Hupp, 1988). La altura máxima de los impactos puede ser utilizada para estimar el caudal mínimo de la inundación.

Igualmente, en los troncos de árboles rotos o doblados por los efectos de las avenidas pueden salir nuevos brotes generalmente un año después de producirse la inundación (Bryan y Hupp, 1984). Estos retoños pueden datarse mediante perforaciones en su base, proporcionándonos un año aproximado para dicha inundación.

La distribución de la vegetación en la llanura aluvial siguiendo antiguos meandros abandonados o colonizando depósitos aluviales como barras, etc. puede ser utilizada para estimar la edad de abandono de los meandros o de acumulaciones asociados a las avenidas (Schumm and Lichty, 1963; Helley y LaMarche, 1973; Hupp y Simon, 1991).

De la descripción de estos indicadores geobotánicos se desprende su utilidad para la datación de avenidas, aunque el intervalo de tiempo de las

mismas aparece limitado por la edad de la vegetación (Wohl y Enzel, 1995).

d) Métodos basados en la competencia del flujo

Este tipo de métodos se basan en relacionar las características de los sedimentos con parámetros del flujo, siendo frecuentes las relaciones entre tamaño de sedimento y la capacidad del transporte (velocidad, tensión de arrastre, etc.). De esta manera, se puede transformar estas variables de capacidad de transporte en paleocaudales utilizando bien relaciones de flujo hidráulico, como la fórmula de Manning, o bien fórmulas empíricas obtenidas de medidas del transporte de sedimentos en cauces. En este segundo tipo de fórmulas se establece los valores de potencia hidráulica crítica o de caudal crítico necesario para el inicio del movimiento. En el caso de estudio de avenidas, se utilizan las partículas más groseras (ej. las 5 partículas de mayor tamaño) para determinar la potencia hidráulica necesaria para su transporte y, a partir de de la misma, el caudal necesario para desarrollar dicha potencia. La potencia hidráulica crítica asociada con un tamaño de partícula no es unívoco, a lo que tenemos que añadir una serie de incertidumbres que resultan de la toma de datos, y de los efectos de los factores físicos todavía no bien establecidos en el transporte de partículas como son la forma de las partículas, acorazamientos del lecho, densidad del fluido, rugosidad y parámetros del flujo (Church, 1978; Maizels, 1983; Williams, 1983).

e) Reconstrucción basada en indicadores de paleoestado

La canalización del flujo durante una avenida deja una serie de indicadores a partir de los cuales puede inferirse el nivel de agua o 'paleoestado' (Fig. 1b). Por un lado, estos indicadores pueden reflejar, la elevación de la inundación, mediante líneas o depósitos de restos vegetales, líneas de arcillas y limos, y marcas de erosión. Por otro lado, pueden indicar la altura mínima que alcanzó el agua durante el caudal punta, mediante depósitos de baja energía, marcas de impacto en troncos de árboles o líneas de erosión.

Los depósitos de inundación de baja energía o "*slackwater deposits*" son los indicadores que nos permiten la obtención del registro más completo sobre las inundaciones pasadas (Baker et al., 1983). Los depósitos de baja energía aparecen formando terrazas por encima del cauce y se reconocen en lugares de flujo inefectivo, donde se produce un estancamiento hidráulico de agua durante la avenida. Dichos estancamientos se localizan principalmente en la desembocadura de barrancos afluentes, zonas de expansión de canal, curvas de meandros y cavidades

en rocas. En sentido estricto, los depósitos de baja energía representan siempre un indicador de mínimo 'paleoestado' o nivel del flujo, ya que la superficie del agua de avenida ha estado situada por encima de estos depósitos. Sin embargo, en la práctica, se ha observado como la máxima elevación de estos depósitos se encuentra próximo a la altura del pico de avenida (Kochel y Ritter, 1987). Estos depósitos de baja energía presentan texturas de arena y limo con potencias que oscilan entre unos pocos centímetros a 1.5 m. Desde el punto de vista sedimentológico, se observa una textura granodreciente con estructuras masiva, laminación horizontal y laminación cruzada. Asimismo, las unidades arenosas con cierta potencia pueden presentar en su base *climbing ripples*.

El reconocimiento de diferentes inundaciones requiere un estudio sedimentológico detallado de los depósitos de baja energía. En general, la complejidad del emplazamiento de la inundación produce variaciones en las condiciones hidráulicas y sedimentológicas que permiten la posterior separación de unidades (Kochel y Baker, 1988). Asimismo, son numerosos los indicadores de exposición subaérea entre niveles de inundación, como grietas de desecación, paleosuelos, acumulación de hojas y ramas, etc.

La cronología de las inundaciones se consigue a partir de la datación de las diferentes unidades. La datación relativa se obtiene a partir de la posición estratigráfica, así como mediante variaciones en las propiedades del material que cambien en función de la edad (Costa, 1978). La datación absoluta es posible a partir de técnicas geoquímicas y arqueológicas. La técnica más utilizada en la datación absoluta es el C-14, tanto mediante contadores de gas como mediante espectrómetro de acelerador de masas (AMS). El AMS es capaz de datar muestras orgánicas de muy pequeño tamaño, tales como semillas, polen, hojas o restos diminutos de carbón vegetal.

Estimación de caudales punta de paleoavenidas

El reconocimiento en campo de indicadores asociados a diferentes picos de avenida a lo largo del canal analizado, el establecimiento de sus relaciones y la datación de los depósitos nos proporciona la información necesaria para la reconstrucción paleohidrológica de las inundaciones. Conocida la altura del flujo durante el caudal punta, la exactitud en los cálculos de los parámetros hidrológicos depende posteriormente de los métodos utilizados en la elaboración de los datos (Fig. 2 y 3).

Son diversas las técnicas que se utilizan en la bibliografía para las determinaciones paleohidrológicas, como por ejemplo las fórmulas de Chezy y Manning para flujo uniforme (Bretz, 1925), o el método de área-pendiente (Dalrymple y Benson,

1967). Sin duda, la mayor exactitud en el cálculo del caudal y velocidad se consigue con los métodos de paso estándar o "step-backwater" en canales abiertos (Chow, 1959; Shearman, 1976), al tener en cuenta las variaciones y pérdidas de energía del flujo de agua. El procedimiento de cálculo es de carácter iterativo de tipo prueba-error y se basan en la resolución de la ecuación de la energía en una dimensión derivado de la fórmula de Bernuilli para flujo estacionario gradualmente variado (Fig. 2 y 3). Los modelos de paso estándar han sido utilizados con éxito en la reconstrucción de inundaciones catastróficas del Lago Bonneville (Jarret y Malde, 1987; O'Connor, 1993) del Lago Missoula (O'Connor y Baker, 1992; Benito y O'Connor, 1991, Benito, 1996) y del Lago Kuray (Baker et al., 1993). En estas inundaciones, generadas por la rotura del lago glacial Kuray hace aproximadamente 15.000 años, se han calculado caudales punta de 18 millones de m³/seg (Baker et al., 1993), constituyendo, sin duda, las mayores inundaciones conocidas en la historia de la Tierra.

Análisis de frecuencia de inundaciones basado en datos de aforo, históricos y de paleoinundaciones

Hidrólogos e ingenieros generalmente han tratado de evaluar la magnitud y frecuencia de las inundaciones como un problema de simple estadística. Normalmente, este procedimiento consiste en analizar estadísticamente una población de datos observados en estaciones de aforo, generalmente con periodos de registro inferiores a 50 años, y extrapolarlos para conocer los percentiles correspondientes a eventos de gran magnitud y con periodos de recurrencia de 100, 500 y 1000 años. Evidentemente, estas extrapolaciones pueden tener sentido matemático pero carecen de toda lógica en los sistemas naturales.

En España, la red de estaciones de aforo se ha modernizado recientemente con la instalación de numerosas estaciones de aforo dotadas con limnógrafo organizadas en los sistemas de información hidrológica S.A.I.H. Estas estaciones de aforo con limnógrafo presentan una media de registros inferior a los 15 años. Las estaciones con registros de gastos anteriores a la regulación de los ríos mediante la construcción de presas son escasas. Por poner un ejemplo, en la Cuenca del Tajo de aproximadamente 185 estaciones de aforos, tan sólo 9 presentan registros superiores a los 50 años. Igualmente, las estaciones de aforo presentan dificultades para registrar los caudales punta extraordinarios, por diversas razones: (1) las curvas de gastos se construyen a partir de las velocidades medidas durante caudales bajos-medios y, por tanto, las velocidades de flujo durante las avenidas extraordinarias son puras extrapolaciones, (2) la sección transversal de algunas estaciones de aforo en

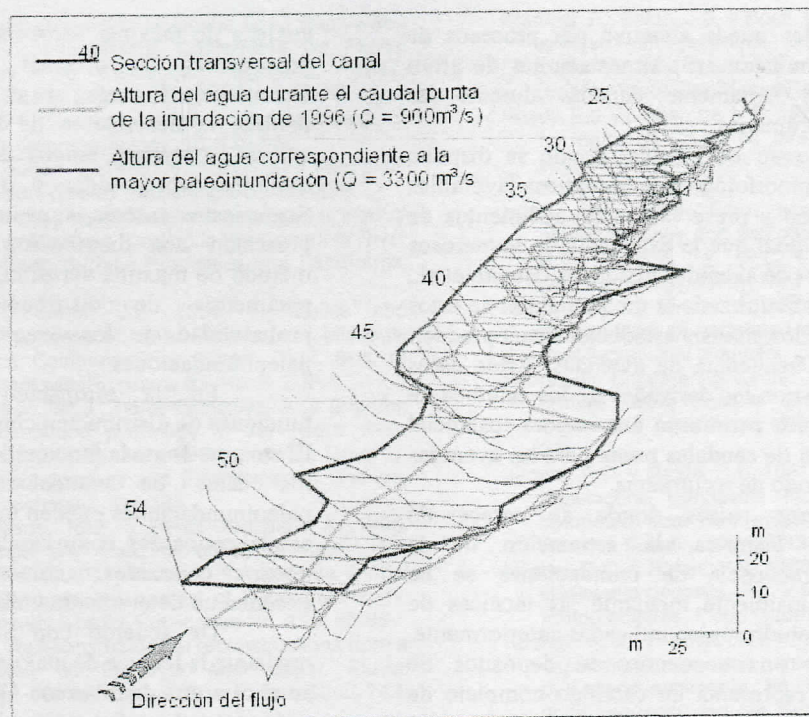


Figura 2: Modelo 3-D del tramo superior de la garganta del río Tago en El Puente del Arzobispo y altura de las superficies del agua durante caudal punta obtenidas a partir del modelo estándar por pasos.

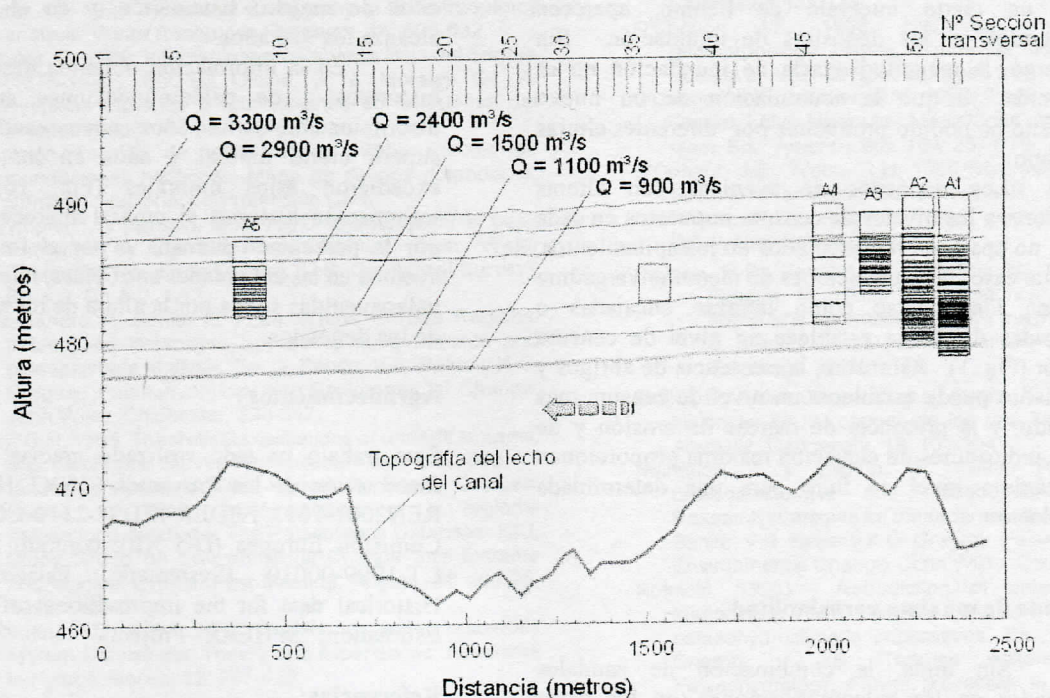


Figura 3 Perfil longitudinal del cauce y de la altura de las superficies del agua calculada para diversos caudales punta que encajan con indicadores geológicos de caudal mínimo. Obsérvese la localización de las columnas estratigráficas de los depósitos de inundación con la separación de las diversas avenidas.

llanuras aluviales puede alterarse por procesos de erosión y acumulación, (3) las estaciones de aforo pueden quedar seriamente dañadas durante las avenidas extraordinarias.

En el caso de España, donde se dispone condiciones geomorfológicas y climáticas favorables a la acumulación y preservación de sedimentos de inundación, al igual que la existencia de numerosos registros escritos de avenidas históricas (Benito et al., 1996b), se ha infrautilizado la incorporación de estos datos dentro de los análisis estadísticos para predecir la magnitud y frecuencia de avenidas. Estos datos históricos junto con los derivados de los estudios de paleoinundaciones permitirán una mejora sustancial en la estimación de caudales punta para las avenidas de elevado periodo de recurrencia.

En otros países donde se carece de documentación histórica, la estimación de la magnitud y frecuencia de inundaciones se ha realizado principalmente mediante las técnicas de análisis de paleohidrológico indicadas anteriormente. En este caso, una secuencia de depósitos de inundación no representa un catálogo completo de avenidas, ya que solamente aparecen representadas aquellas inundaciones que han superado determinadas cotas. Estas cotas o niveles discriminantes se elevan con el tiempo, a medida que se 'apilan' nuevos depósitos. En principio podemos asumir que todos los eventos de magnitud superior al nivel impuesto por la altura de los niveles de inundación anteriores, para un cierto intervalo de tiempo, aparecen registrados en los depósitos de inundación. Sin embargo, la magnitud exacta de inundación no es conocida, ya que la acumulación de un nuevo depósito ha podido producirse por diferentes alturas del flujo.

Los depósitos de avenidas con alturas inferiores a los niveles de censura impuestos en cada caso, no aparecen representados en los apilamientos. En este caso, las inundaciones de menor envergadura pueden identificarse como terrazas encajadas o solapadas donde se establece un nivel de censura menor (Fig. 1). Asimismo, la existencia de abrigos y cavidades puede establecer un nivel de censura más elevado, y la presencia de marcas de erosión y de otros indicadores de elevación máxima proporcionan el máximo nivel de flujo para una determinada inundación.

Método de máxima verosimilitud

Sin duda, la combinación de caudales estimados en las paleoinundaciones, en los datos históricos y en las estaciones de aforo podrían enriquecer en gran medida el análisis de frecuencia de inundaciones. En la literatura, se describe el desarrollo de diversos algoritmos que mediante el

análisis de máxima verosimilitud se integran datos procedentes de diversas fuentes (Stedinger y Cohn, 1986; Francés et al., 1993). Este método permite la descripción de los datos en forma de valores concretos, rangos de caudales o umbrales mínimos sobrepasados o máximos no excedidos. Según estos autores, si asumimos que las avenidas presentan una distribución paramétrica dada, el método de máxima verosimilitud (MMV) estima los parámetros de distribución maximizando la probabilidad de los eventos de inundaciones y paleoinundaciones.

En la estimación paramétrica de las funciones de distribución como Gumbel, LogPearson III etc., mediante la función de máxima verosimilitud, los datos de inundaciones históricas y de paleoinundaciones pueden incluirse como valores de caudal conocidos, como caudales con rangos mínimo-maximo conocidos o como valores de caudal que exceden un determinado umbral mínimo.

De acuerdo con Stedinger et al. (1988), mediante la técnica de máxima verosimilitud, cuando se encaja una distribución Gumbel de 2-parámetros, cada dato de información histórica o prehistórica equivale a una media 0.05 y 0.11 años del registro sistemático. De tal manera, por cada 1000 años del periodo histórico se produce una mejora en la estimación de la distribución Gumbel equivalente a un registro sistemático de 50 y 110 años, y en el caso de Gumbel 3-parámetros la mejora equivale a 300 años de registro sistemático, y en el mejor caso alcanza los 990 años.

En la información obtenida mediante datos históricos y de paleoinundaciones subyace una discriminación entre años cuyo caudal máximo superó cierto umbral y años en los que no se excedieron estos umbrales (Fig. 1c). En la información histórica el umbral aparece concretado por la percepción humana ó por el impacto de la avenida en las actividades antrópicas, mientras que en paleoavenidas se fija por la altura de los apilamientos de los depósitos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo y financiación de los Proyectos CICYT HID99-0850, REN2001-1633, FEDER 1FD97-2110-CO2-02, y por Comisión Europea (DG XII), contrato No. EVG1-CT-1999-00010 (Systematic, Palaeoflood and Historical data for the improvEment of flood Risk Estimation, "SPHERE" Project).

Referencias

- Baker, V.R., Benito, G. y Rudoy, A. 1993. Paleohydrology of Late Pleistocene Superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*, **259**: 348-350.
Baker V.R., Kochel, R.C., Patton, P.C., y Pickup, G., 1983.

- Paleohydrologic analysis of Holocene flood slack-water sediments. En: International Conference on Fluvial Sedimentology, 2d, Glasgow, Scotland, 1981, Proceedings. Keele, England, Blackwell, 229-239.
- Baker, V.R., 1994. Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology*, 10, 139-156.
- Bedient, P. B. y Huber, C. 1988. Hydrology and floodplain analysis. Addison-Wesley Publishing Co., 452-478.
- Benito, G. 1996. Energy expenditure and geomorphic work of the cataclysmic Missoula flooding in the Columbia River gorge, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22: 457-472.
- Benito, G. y O'Connor J.E. 1991. Hydraulics and geomorphic features of late Pleistocene Missoula flooding in the Columbia River Gorge. *Geol. Soc. of America Abstract with Programs* 23, No. 5, 207
- Benito, G., Machado, M^a.J.; Pérez-González, A. y Sopena, A. 1998. Palaeoflood hydrology of the Tagus river, Central Spain. En: G. Benito; V.R. Baker y K.G. Gregroy, editores. *Palaeohydrology and Environmental Change*, John Wiley, Chichester, 317-333.
- Benito, G., Machado, M^a.J. y Pérez-González, A. 1996. Climate change and flood sensitivity in Spain. En: Branson, J., Brown, A.G. y Gregory, K.J. editores. *Global Continental Changes: the context of Palaeohydrology*. Geological Society Special Publication No. 115, 85-98.
- Church, M. 1978. Palaeohydrological reconstructions from a Holocene valley fill. En: A.D. Miall editor *Fluvial Sedimentology*, Memoir 5, Can. Soc. Petrol. Geol., 743-772.
- Bretz, J.H. 1925. The Spokane flood beyond the Channeled Scablands. *Journal of Geology*, 33: 97-115.
- Bryan, B.A. y Hupp, C.R. 1984. Dendrogeomorphic evidence of channel morphology changes in an east Tennessee coal area stream. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 65, 891
- Chow, V.T. 1959. *Open-channel hydraulics*. New York, McGraw-Hill, 680p.
- Costa, J.E. 1978. Holocene stratigraphy in flood-frequency analysis. *Water Resources Research*, 14: 626-632.
- Canales, G. 1989. Inundaciones de la Vega Baja del Segura (1875-1925). En: Gil Olcina, A. & Morales Gil, A. *Avenidas Fluviales e Inundaciones en la Cuenca del Mediterráneo*. Alicante, 415-433.
- Comisión Técnica de Inundaciones 1985). *Estudio de inundaciones históricas: Mapa de riesgos potenciales*. Comisión Nacional de Protección Civil.
- Dalrymple, T. y Benson, M.A. 1967. Measurement of peak discharge by the slope-area method. *Tech. Water Resources Research Division (U.S. Geological Survey)*, Book 3, Ch.A-2, 1-12.
- Díez-Herrero, A., Benito, G. y Lain-Huerta, L. 1988. Regional palaeoflood databases applied to flood hazards and palaeoclimate analysis. En: G. Benito; V.R. Baker y K.G. Gregroy. *Palaeohydrology and Environmental Change*, John Wiley, Chichester 335-347
- Dury, G.H. 1965. Theoretical implications of underfit streams. *U.S. Geological Survey Professional Paper* 347 66p.
- Fernández de Villalta, M., Díez-Herrero, A., Benito, G. y Lain Huerta, L. 1998. Implementation of a regional palaeoflood database: The Palaeotagus Database. IGU, Study Group on Environmental Change and Extreme Hydrological Events. First Meeting, August 28 and 29, 1998. Lisbon.
- Feldman, A.D. 1981. HEC models for water resources system simulations. Theory and experiences. *Advances in Hydrosciences*, 12: 297-423.
- Font, I. 1988. *Historia del clima en España. Cambios climáticos y sus causas*. Instituto Nacional de Meteorología. Madrid, 297 p.
- Fontana-Tarrats, J.M. 1977. Entre el cardo y la rosa. 269 pp (inédito).
- Frances, F., Salas, J.D. y Boes, D.C. 1993. Flood frequency analysis with systematic, historical and paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. *Water Resources Research*, 30: 1653-1664.
- Helley, E.J. y Lamarche, V.C. 1973. Historic flood information for northern California streams from geological and botanic evidence. *US Geological Survey Professional Paper* 485-E, 1-16.
- Hupp, C.R. 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. En: V.R. Baker, R.C. Kochel y P.C. Patton editores. *Flood geomorphology*, Wiley New York, 335-356.
- Hupp, C.R. y Simon, A. 1991. Bank accretion and the development of vegetated depositional surfaces along modified alluvial channels. *Geomorphology*, 4: 111-124.
- Hydrologic Engineering Center 1985. HEC-2 water surface profiles users manual. The Hydrologic Engineering Center (US Army Corps of Engineers), Davis, California, 37p.
- Jarrett R.D. y Malde, H.E. 1987. Paleodischarge of the late Pleistocene Bonneville Flood, Snake River, Idaho, computed from new evidence. *Geological Society of America Bulletin*, 99: 127-134.
- Kochel, R.C. y Baker, V.R. 1988. Paleoflood analysis using slackwater deposits. En: V.R. Baker R.C. Kochel y P.C. Patton editores. *Flood Geomorphology*, 377-391.
- Kochel, R.C. y Ritter D.F. 1987. Implications of flume experiments on the interpretation of slackwater paleoflood sediments. En: V.J. Singh editor. *Regional flood frequency analysis*, 365-384. D. Reidel, Boston.
- Leese, M.N. 1973. Use of censored data in the estimation of Gumbel distribution parameters for annual maximum flood series. *Water Resources Research*, 9: 1534-1542.
- Masachs, V. 1948. *El régimen de los ríos Peninsulares*. CSIC. Barcelona, 511p.
- Maziels, J.K. 1983. Paleovelocity and paleodischarge determination for coarse gravel deposits. En: K.J. Gregory editor., *Background to Paleohydrology*, Wiley, Chichester 101-139.
- O'Connor, J.E. 1993. Hydrology, hydraulics, and geomorphology of the Bonneville flood. *Geological Society of America Special Paper*, 274, 83 pp.
- O'Connor, J.E. y Baker, R.V. 1992. Peak discharges from Glacial Lake Missoula- Magnitudes and implications. *Geol. Soc. America Bull.* 104: 267-279.
- O'Connor, J.E., Webb, R.H. 1988. Hydraulic modelling for paleoflood analysis. En: Baker, V.R., Kochel, R.C., y Patton, P.C., editores. *Flood geomorphology*. John Wiley, New York. 393-402.
- Pavese, M.P., Banzon, V., Colacino, M., Gregori, G.P. & Pasqua, M. 1992. Three historical data series on floods and anomalous climatic events in Italy. En: R. S. Bradley & P. D. Jones. *Climate Since A.D.1500*. Routledge. pp.155-170.
- Pinilla, L., Pérez González, A. y Benito, G. 1995. Cambios históricos de los cauces de los ríos Tajo y Jarama en Aranjuez. *Geogaceta*, 18: 101-104.
- Reinfelds, I y Bishop, P. 1998. Palaeohydrology, palaeodischarges and palaeochannel dimensions: Research strategies for meandering alluvial rivers. En: G. Benito; V.R. Baker y K.G. Gregroy. *Palaeohydrology and Environmental Change*, John Wiley, Chichester, 27-42.
- Rotnicki, 1991). *Retrodiction of paleodischarges of Meandering and sinuous alluvial rivers and its palaeohydroclimatic implications*. En: L. Starkel, K.J. Gregory y J.B. Thornes editores. *Temperate Palaeohydrology. Fluvial processes in the Temperate zone during the last 15,000 years*. Willey. 431-471
- Salas, J.D., Wohl, E.E. y Jarrett, R.D. 1994. Determination of flood characteristics using systematic, historical and palaeoflood data. En: G. Rossi, N. Harmancioglu y V. Yevjevich, editores. *Coping with floods*, Kluwer

- Academic Publishers, 111-134.
- Schumm, S.A. 1968. River adjustment to altered hydrologic regimen, Murrumbidgee River and paleochannels, Australia. U.S. Geological Survey Professional Paper 598, 65p.
- Schumm, S.A. y Litchy, R.W. 1963. Channel widening and flood-plain construction along Cimarron River in southwestern Kansas. US Geological Survey Professional Paper 352-D, 71-88.
- Shearman, J.O. 1976. Computer applications for step-backwater and floodway analysis. Geol. Surv. Open-File Report (U.S.). 76-499.
- Stedinger, J. y Cohn, T.A. 1986. Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. *Water Resources Research*, **22**: 785-793.
- Stedinger, J., Therivel, R. y Baker, V.R. 1988. Flood frequency analysis with historical and paleoflood information, Salt and Verde Rivers, Arizona. Proceedings of the Eighth Annual Meeting of the U.S. Committee on Large Dams, Salt River Project, Phoenix, Arizona, 3.1-3.35.
- Walling D.E. 1983. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, **65**: 209-237
- Williams, G.P. 1983. Paleohydrological methods and some examples from Swedish fluvial environments, I Cobble and boulder deposits. *Geografiska Annaler* **65**^a 227-243.
- Wohl, E.E. y Enzel, Y. 1995. Data for Palaeohydrology. En: K.J. Gregory, L. Starkel y V.R. Baker editores. *Global Continental Palaeohydrology*. John Wiley, Chichester, 23-59.
- Wolman, M.G. y Miller, J.P. 1960. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, **68**: 54-74.