

REGISTROS FLUVIALES EN LA PENÍNSULA IBÉRICA DURANTE LA PEQUEÑA EDAD DEL HIELO

G. Benito y V. R. Thorndycraft

Centro de Ciencias Medioambientales; CSIC;
Serrano 115 bis; 28006 Madrid
E-mail: benito@ccma.csic

Resumen: En este trabajo se analizan los datos cronológicos de radiocarbono procedentes de sedimentos fluviales en diferentes cuencas españolas para los últimos 1000 años. Los registros sedimentarios de llanura aluviales muestran un periodo principal de aluvionamiento ocurrido entre 800 y 500 cal. BP, mientras que los registros de paleocrecidas se concentran antes y después del mismo, particularmente entre 1000-800 cal. BP y 520-250 cal. BP. Este segundo periodo con mayor frecuencia de paleocrecidas aparece relacionado con la Pequeña Edad del Hielo, y coinciden con los obtenidos mediante registros documentales. Los resultados señalan la elevada sensibilidad de los registros de paleocrecidas que constituyen evidencias directas (“no proxy”) de eventos hidrológicos extremos, mientras que los depósitos aluviales representan la respuesta del conjunto de la cuenca a los cambios ambientales, hidrológicos y climáticos.

Palabras clave: Registros fluviales, Pequeña Edad del Hielo, España.

Abstract: A database of radiocarbon dates from fluvial environments in Spain was critically analysed in order to obtain a fluvial chronology over the last 1000 years. Analysis of the different depositional environment data-sets using summed probability plots identified phases of alluviation at 800-500 cal. BP. Increased frequency of large magnitude floods occurred at 2850-2500, 1000-800 and 520-250 cal. BP. The results indicate that in Mediterranean regions slackwater flood deposits are valuable archives of climatic variability even during periods of increased human impact.

Key words: Fluvial environments, radiocarbon dates, Little Ice Age, Spain.

G. Benito & V.R. Thorndycraft (2005): Registros fluviales en la Península Ibérica durante la Pequeña Edad del Hielo. Boletín Glaciológico Aragonés, 6: 97-118.

1. Introducción

Las regiones mediterráneas, y la Península Ibérica en particular, presentan una elevada sensibilidad a cambios climáticos y ambientales debido a su frágil equilibrio hidrológico, climático y biológico (Vita-Finzi, 1969; Butzer, 1974, 1975; Lewin *et al.*, 1995). Esta sensibilidad se muestra en la variabilidad espacial y temporal de indicadores naturales como la desertificación, crecidas, sequías y biodiversidad, los cuales se encuentran íntimamente ligados a factores de cambio global del clima y de actividad humana. La localización climática de la Península Ibérica entre el límite meridional de la acción del frente Polar y bajo la influencia del cinturón sub-tropical proporciona un elevado potencial para reflejar los pulsos del Cambio Global.

La historia hidrológica de las cuencas Ibéricas está marcada por una compleja alternancia de episodios húmedos y secos con transiciones abruptas relacionadas con el impacto de los cambios en la circulación atmosférica y de las corrientes oceánicas. Sin embargo, descifrar los cambios paleohidrológicos de la Península Ibérica a partir de las secuencias aluviales es una tarea compleja debido a los problemas en la identificación de las sucesivas fases de eventos cíclicos locales, su datación interna y correlación externa, y a la incertidumbre en su génesis en una región con una larga historia de intervención humana (Butzer, 1980 p. 133-134; Macklin *et al.*, 1995). En los sistemas fluviales los mejores indicadores de tales variaciones comprenden secuencias de incisión y relleno de las llanuras aluviales (Butzer *et al.*, 1983), las cuales pueden registrar cambios, en periodos de tiempo largos (0.1-1 ka), en el caudal de sedimentos, o en el registro sedimentario de eventos individuales, tales como crecidas, tormentas, sequías o impactos humanos en el ambiente (Benito *et al.*, 2003a; Thorndycraft *et al.*, 2005). En las últimas décadas se han desarrollado enormemente los métodos de reconstrucción y análisis de la hidrología de paleocrecidas que permiten la reconstrucción de la magnitud y frecuencia de eventos extremos de inundaciones pasadas y su utilización tanto en el análisis de riesgos de inundaciones (Baker & Kochel, 1988; Benito & Thorndycraft, 2004), como en el estudio de la sensibilidad de las cre-

cidas a la variabilidad climática del pasado, conducente a predecir pautas futuras de las crecidas en los escenarios de Cambio Climático (Benito *et al.*, 2005).

Los registros geomorfológicos y sedimentarios, junto con otro tipo de registros documentales, se han aplicado al estudio de la evolución climática para el norte del área Atlántica durante el pasado milenio y, en concreto, en el estudio de dos periodos climáticos generalizables como son el Periodo Cálido Medieval (Medieval Warm Periodo o MWP) y la Pequeña Edad del Hielo (PEH) o miniglaciación. A pesar del consenso general sobre la existencia de estos periodos climáticos generales en el ámbito del Atlántico norte, existen todavía importantes inconsistencias sobre el marco temporal, signo climático y respuesta del ciclo del agua a estos periodos climáticos a escala continental. La duración del Periodo Cálido Medieval comprendería entre 900 y el 1200 AD según Lamb (1977), y del siglo IX hasta quizás mediados del siglo XV, según Hughes & Diaz (1994). Por su parte, la Pequeña Edad del Hielo comprendería desde el final del MWP hasta el siglo XIX (Grove, 1988), aunque la duración y las fechas de inicio en diferentes regiones del Hemisferio Norte se encuentran todavía actualmente en debate. En este sentido, las estimaciones sobre su inicio oscilan entre el siglo XIII y el XIV dependiendo de la zona (Grove, 1988). Así, Porter (1986) mantiene que la PEH comienza en torno al 1250 AD, mientras que de acuerdo con Pfister *et al.*, (1996), y Pfister & Brázdil (1999), en Europa central comenzó poco después del 1300 AD. En la región Mediterránea y la Península Ibérica en particular, la falta de datos hace difícil apuntar a un inicio para este periodo climático, aunque se pueden esperar algunos retrasos en su inicio preciso de acuerdo a la evidencias centro europeas para latitudes septentrionales. En Italia, Camuffo & Enzi (1992) establecieron que el inicio de la PEH estuvo marcado por una larga serie de inviernos severos en la mitad del siglo XV.

Parece evidente que los cambios en el clima pueden producir considerables efectos en la dinámica fluvial y la geomorfología, principalmente en forma de agradación o incisión, cambio en los patrones de canales y en la carga de sedimentos (Schumm, 1977). En la Península Ibérica, la respuesta hidrológica y geomorfológica a las variaciones cli-

máticas cambiantes de la PEH todavía no se han determinado con detalle de forma generalizada, principalmente debido a: (1) la falta de estudios detallados de las llanuras aluviales holocenas, quizás motivada por la dificultad logística de realizar excavaciones en las llanuras aluviales y paleocauces, (2) problemas de preservación de los sedimentos y morfologías en medios todavía sujetos a reabajamiento de los materiales previamente acumulados, y (3) imprecisiones cronológicas de los métodos existentes (radiocarbono y luminiscencia óptica estimulada). A pesar de ello, en los tramos donde se disponen de series continuas los datos disponibles resultan prometedores, aportando información precisa tanto de la hidrología como de la carga de sedimento y la dinámica fluvial.

En este trabajo se analiza la respuesta hidrológica de diversos sistemas fluviales de la Península Ibérica en los últimos 1000 años, con especial énfasis a los registrados en la Pequeña Edad del Hielo. Este estudio comprende por un lado el análisis de las cronologías de radiocarbono disponibles en la literatura (ver Thorndycraft y Benito, en prensa a y b) y, por otro, los resultados de algunos estudios de detalle sobre cambios en la frecuencia y magnitud de crecidas obtenidas a partir del análisis de paleocrecidas e información documental (Benito *et al.*, 2003 a y b).

2. Metodología

El estudio de los registros aluviales utilizados en este trabajo se basa en los trabajos recientemente publicados por Thorndycraft y Benito (en prensa a y b), donde se han recopilado las dataciones de radiocarbono realizadas en relación a registros fluviales y publicadas en revistas especializadas (Tabla 1). Las dataciones de radiocarbono asociadas con yacimientos arqueológicos no fueron incluidas para evitar introducir sesgos en el registro fluvial hacia periodos relacionados con emplazamientos humanos de la llanura aluvial (c.f. Macklin & Lewin, 2003). En total se han recopilado 102 dataciones de C-14 para el Holoceno, de las cuales 28 fueron rechazadas debido a: (1) insuficiente información

sobre su contexto sedimentario, (2) elevados errores de datación (mayores de ± 100), o (3) debido a que la edad fuera demasiado reciente para su calibración (150 BP). En concreto, el número de muestras datadas para los últimos 3000 años (3000-150 edad convencional BP) asciende a 47. La localización de las dataciones se muestra en la Figura 1, con el listado con las referencias originales en la Tabla 1. Las dataciones de radiocarbono fueron calibradas mediante el programa de calibración OXCAL (Bronk Ramsy, 2000; versión 3.5, septiembre 2003), con el objeto de estandarizar el conjunto de los datos. De acuerdo a las especificaciones proporcionadas por Macklin & Lewin (2003), de esta base de datos se han extraído aquellas muestras que por su ambiente deposicional y/o contexto sedimentario señalaran un cambio particular en el estilo de sedimentación. En concreto, las dataciones relacionadas con cambios sedimentarios en los últimos 3000 años fueron 34 (Thorndycraft & Benito, en prensa a). El análisis de los datos incluidos en la base de datos se ha realizado mediante el comando de suma de probabilidades del programa de calibración OXCAL, siguiendo la metodología propuesta por Johnston *et al.* (en prensa) para la base de datos de radiocarbono recogida para el Reino Unido. Los resultados se muestran como gráficas de suma de probabilidades, donde el eje y es la probabilidad anual y el eje x es la edad calibrada de radiocarbono, lo que esencialmente ilustra la distribución temporal de todas las dataciones incluidas en el análisis.

En el apartado de la respuesta de la frecuencia y magnitud de las crecidas a la Pequeña Edad del Hielo se ha utilizado la metodología desarrollada para el estudio de la hidrología de paleocrecidas (Baker, 1987), en diferentes cuencas de la Península Ibérica (Benito *et al.*, 2003a, Thorndycraft *et al.*, 2004, 2005). La hidrología de paleocrecidas utiliza evidencias geológicas y geomorfológicas en la reconstrucción de la magnitud y frecuencia de crecidas actuales y pasadas (Baker *et al.*, 2002). Las evidencias usadas más frecuentemente son los depósitos de crecida acumulados en zonas de remanso y que indican los niveles mínimos de inundación alcanzados por las crecidas y que pueden ser utilizados para estimar la magnitud y frecuencia de las inundaciones (Baker, 1987; Benito *et al.*, 2003a). Durante crecidas, los niveles de

durante crecidas, 11 muestras de sedimentos de llanura de inundación, 3 muestras de depósitos de canales aluviales y 2 muestras de depósitos coluviales.

La Figura 2 muestra las gráficas de suma de probabilidades para los últimos 3000 años de acuerdo al ambiente deposicional, permitiendo la comparación entre los principales ambientes sedimentarios representados en la base de datos. Las muestras en gravas aluviales indican una mayor actividad fluvial para los periodos 2700-2150 cal. BP, 1050-900 cal. BP y 550-300 cal. BP. Las muestras de las llanuras de inundación apuntan al incremento en la sedimentación para los periodos 2700-2350, 1300-1150, y 900-500 cal. BP, esta última fase representa la mayor fase de acumulación.

En los últimos 2000 años, los registros sedimentarios de paleocrecidas presentan una concentración anómala de eventos en los periodos 1000-800 cal. BP y 520-250 cal. BP (Benito & Thorndycraft, 2005; Fig. 2). La resolución de la técnica de carbono-14 para los últimos 300 años es escasa por lo que este último periodo puede presentar errores en la determinación de las dataciones. Esta distribución temporal de las paleocrecidas se puede afinar considerando exclusivamente aquellas secuencias en las que se dispone de múltiples dataciones y eliminando aquellas realizadas en perfiles con dataciones aisladas. Los periodos con mayor concentración de datación de paleocrecidas corresponden 1000-1200 AD, 1430-1685 AD y 1730-1810 AD (Fig. 2C). Estos

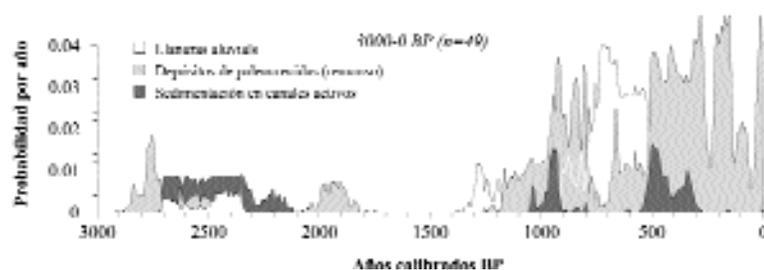


Figura 2. Diagrama donde se muestra la suma de probabilidades de muestras datadas mediante radiocarbono (últimos 3000 años) en depósitos fluviales en España, para diferentes ambientes sedimentarios (según Thorndycraft & Benito, en prensa).

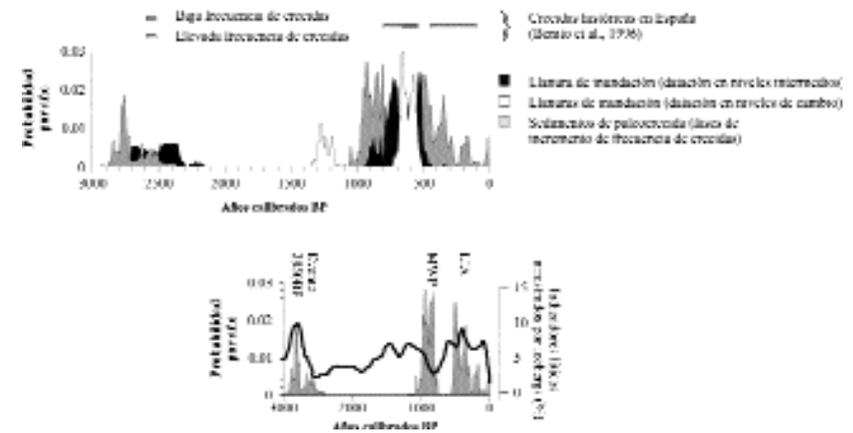


Figura 3. A: Suma de probabilidades calculadas utilizando las muestras procedentes de contactos entre niveles o en la base de una secuencia y que marcan un cambio en la sedimentación, muestras en puntos intermedios de una secuencia aluvial, y muestras que limitan periodos datados con paleocrecidas. B: Suma de probabilidades de los depósitos de paleocrecidas representada junto con la curva de la variación de los sedimentos arrastrados por icebergs en el Atlántico Norte (Bond et al., 2001), donde se muestra la sensibilidad de las crecidas como indicador climático proxy en periodos de variabilidad climática como el Periodo Cálido Medieval y la Pequeña Edad del Hielo (modificada de Thorndycraft & Benito, en prensa).

periodos coinciden con los obtenidos a partir del registro documental, donde se observa un incremento en la frecuencia de crecidas de elevada magnitud en las cuenca Atlánticas de la Península Ibérica durante los periodos 1150-1290, 1590-1610, 1730-1760, 1780-1810, 1870-1900, 1930-1950 y 1960-1980 (Benito et al., 1996, 2003b; Fig. 5).

La reconstrucción de los caudales asociados a paleocrecidas y crecidas documentales se ha realizado en diversos tramos de los ríos Tajo, Llobregat, Ter, y Segre (Benito, 2003a, b; Rico, 2004; Thorndycraft et al., 2004, 2005). En el río Tajo, los registros de paleocrecidas indican que los caudales punta más elevados ocurrieron durante los periodos 1150-1210 AD y 1850-1900 AD (Fig. 3). En el tramo del río Tajo en Alcántara (Cáceres), la máxima elevación para las evidencias geológi-

cas de paleocrecidas presenta un caudal mínimo asociado de $15.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. En particular, en uno de los perfiles estratigráficos estudiados se ha estimado un caudal mínimo de $12.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, indicando que al menos 3-4 crecidas de esta magnitud han tenido lugar después de 785-885 AD. Las dataciones de radiocarbono no presentan suficiente resolución como para asignar años concretos a estos eventos. Sin embargo, la magnitud de las crecidas a finales de la PEH, tales como las producidas en 1856, 1876, superaron los $3.100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en Puente del Arzobispo (Toledo) y los $15.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en Alcántara (Cáceres) (Benito et al., 2003a).

Igualmente, los registros documentales señalan que durante la Pequeña Edad del Hielo se produjeron diversas crecidas catastróficas ocasionadas por las lluvias continuadas y torrenciales como las ocurri-

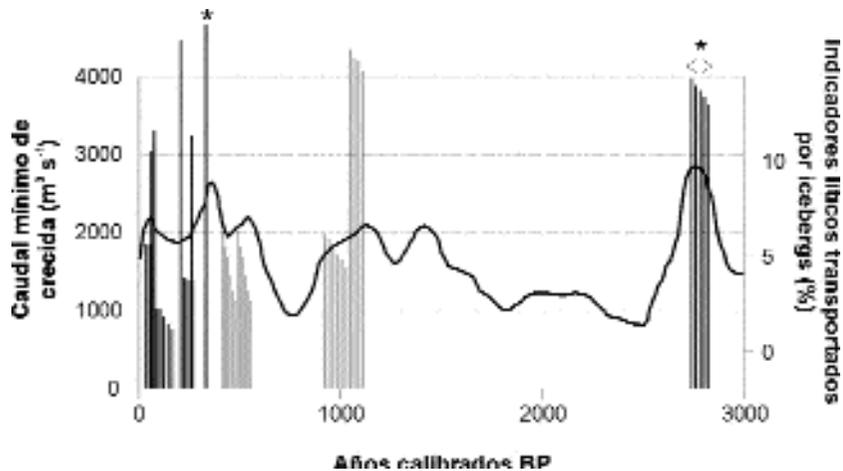


Figura 4. Magnitud y frecuencia de las paleocrecidas durante los últimos 3000 años en los ríos Tajo y Llobregat (Benito & Thorndycraft, 2005). La escala de los caudales para las crecidas del río Tajo en Alcántara se debe multiplicar por tres. Las crecidas del río Llobregat están señaladas con asterisco. Igualmente se muestra la curva de la variación de los sedimentos arrastrados por icebergs en el Atlántico Norte (Bond et al., 2001). Nótese que los mayores porcentajes de sedimentos transportados por icebergs se relacionan con periodos de enfriamiento global.

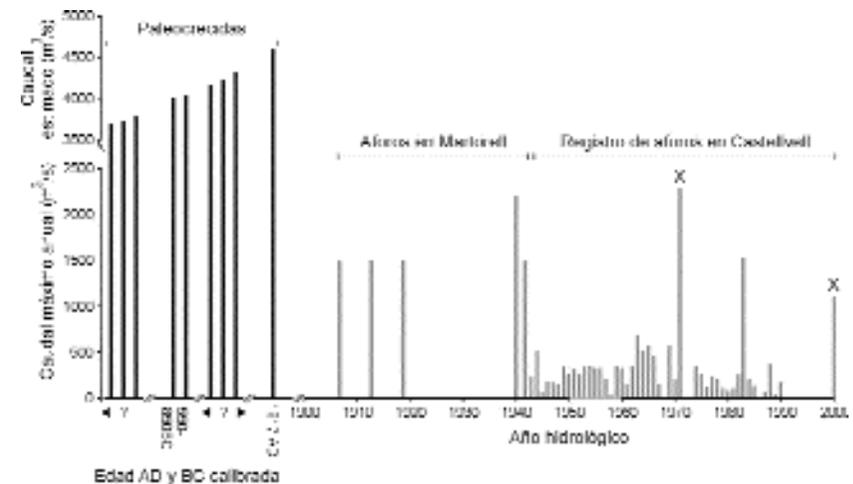


Figura 5. Caudales estimados de crecidas máximas producidas en los últimos 3000 años en el tramo medio-inferior de río Llobregat mediante registros geológicos, junto con los registrados en las estaciones de aforo de Martorell y Castellvell (modificado de Thorndycraft et al., 2004).

das en 1603-1604, 1626, 1708 y 1739 AD (Benito et al., 1996) y que afectaron a la mayor parte de las cuencas atlánticas (Guadalquivir, Guadiana, Tajo, Duero). Sin embargo, en la mayor parte de estas crecidas no se dispone de datos de calado o altura del nivel de agua durante la crecida.

En las cuencas mediterráneas, las fuentes documentales destacan el incremento y severidad de las inundaciones en 1580-1620 y 1840-1870 AD (Barriandos & Martín Vide, 1998; Llasat et al., 2005). Entre las crecidas más catastróficas destaca la producida en 1617 en Cataluña, conocida como el “año del diluvio” (Barriandos, 1995). El caudal estimado para la crecida de 1617 en el río Llobregat es de $4.500 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Thorndycraft et al., 2005; Fig. 4), lo que supone un caudal que duplica la mayor crecida del registro instrumental ($2.300 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la estación de aforos de Monistrol).

Los datos de paleocrecidas disponibles indican que probablemente se produjeron otros dos eventos de magnitud similar al ocurrido en noviembre de 1617 en la vertiente mediterránea, aunque su cronología precisa no se ha podido establecer (Thorndycraft et al., 2004).

4. Discusión

La mayor parte de dataciones de radiocarbono del registro holoceno corresponden a los últimos 1350 años, proviniendo en gran medida de muestras tomadas en terrazas aluviales (tanto sedimentos finos de *overbank* como facies de gravas) y en depósitos de remanso asociados a crecidas. Estas circunstancias son debidas posiblemente al incremento del potencial de preservación y/o al incremento del impacto humano en el modelado (ver la revisión reciente del tema realizada por Lewin & Macklin, 2003).

Uno de los principales problemas presentados en la interpretación de las secuencias aluviales radica en la dificultad de separar el impacto del clima y las actividades humanas en los cambios observados en los registros fluviales. Algunos estudios realizados en España en relación con yacimientos arqueológicos ponen de manifiesto que la actividad humana ha sido un factor importante en la generación de depósitos aluviales, con numerosos rellenos aluviales que post-datan un intensivo uso del suelo durante la ocupación Romana (Vita Finzi, 1969; Butzer, 1980; Gutiérrez Elorza y Peña, 1998). Los registros de polen evidencian un incremento significativo de la deforestación desde hace 2000 años (Allen et al., 1996; Burjachs et al., 1997; Santos et al., 2000). Burjachs et al. (1997) muestran en diferentes puntos del Este de España, que el polen arbóreo de los registros estudiados disminuye desde hace 1700 años, asociado al incremento en el porcentaje de los taxones de cultivo. De cualquier forma, la deforestación no se produce de forma paralela en la Península sino que existen importantes variaciones. Por ejemplo, los registros de polen del Lago de Entanya indican que la deforestación en los Prepirineos se detecta desde los siglos 8-10 (Riera et al., 2004), mientras que en las montañas de Galicia no

se constata hasta el último milenio (Santos et al., 2000). A pesar de que la actividad humana ha podido ser el desencadenante principal de la actividad geomórfica a escala puntual, no parece claro que la actividad agraria hace 2000 años fuera suficiente como para generar un incremento de la actividad fluvial en cuencas de tamaño mediano y grande. De hecho, la mayor parte de las cuencas estudiadas no experimentan un incremento de la dinámica fluvial hasta después del año 1000 AD. En este sentido, la actividad humana se considera que amplifica los efectos morfogenéticos del clima en los sistemas fluviales mediante el desencadenamiento de la inestabilidad ambiental y el acortamiento de la duración de los periodos de agradación e incisión (Ballais, 1995). De acuerdo con Ballais (1995), las variaciones bioclimáticas durante el periodo histórico se consideran efectivas si los geosistemas han sido considerablemente modificados por la actividad humana. La regionalización de los procesos y la evolución paralela del modelado pueden constituir un argumento a favor del efecto del clima como responsable de la morfogénesis de un periodo concreto (Gutiérrez Elorza y Peña, 1998).

Cualquiera que sea la razón del incremento en el número de dataciones de radiocarbono en los últimos 1300 años, la distribución temporal de las dataciones parece responder a cambios de la actividad climática y/o el impacto humano en el modelado. El análisis de la distribución de las dataciones en los diferentes ambientes deposicionales indica que durante el último milenio los registros aluviales y de paleocrecidas se producen en periodos diferentes, con dos fases de acumulación de los depósitos de crecida producidos antes y después del principal periodo de aluvionamiento entre el 900-500 cal. BP. En la Figura 3 se ha plasmado la probabilidad acumulada resultante de las dataciones de radiocarbono que representan cambios en la sedimentación y que permiten distinguir de manera precisa los distintos periodos de actividad fluvial. Igualmente, se ha utilizado solamente la datación más reciente y más antigua de aquellos depósitos de crecidas en los que se disponga de múltiples dataciones. En todos los casos, los rangos de edad dos sigma (95.4% de probabilidad de una datación de estar comprendida dentro de ese rango en particular) que se superponen definen

tres periodos con incremento en la frecuencia de las crecidas, ocurridos entre 2850-2500 cal. BP, 1000-800 cal. BP y 520-250 BP cal. BP (Fig. 3). Igualmente, existen algunas dataciones de niveles de crecidas extremas que se han datado de forma aislada, y que se encuentran así mismo incluidas en el periodo 520-250 cal. BP y un par de ellas pre-datan, o ligeramente se incluyen, en el periodo 1000-800 cal. BP.

La información documental permite “certificar” los datos encontrados en el registro sedimentario. En el análisis del registro de crecidas históricas en España, Benito et al. (1996) identifican dos grandes periodos con un aumento en la frecuencia de crecidas (1150-1290 AD y 1500-1850 AD), separados por un periodo entre 1290 y 1400 con escasos eventos de crecidas (Figs. 2B y C). Esta distribución temporal de los registros documentales encaja en líneas generales con los registros de paleocrecidas, manteniendo dos periodos con crecidas de elevada magnitud separados por un periodo con escasas crecidas extremas (solamente una unidad de paleocrecidas se ha datado en el periodo 650-500 cal. BP).

A la luz de los resultados expuestos cabe preguntarse hasta que punto la distribución de la frecuencia de crecidas refleja o está asociada a la variabilidad climática. Las dataciones de paleocrecidas muestran que los periodos 1000-800 cal. BP y 520-250 cal. BP coinciden con el final del Periodo Cálido Medieval (siglos IX-XIV) y la Pequeña Edad del Hielo (siglos XIV-XIX) respectivamente, aunque este último periodo se ha asociado frecuentemente con un incremento en la actividad fluvial (Rumsby & Macklin, 1996, Grove, 2001; Macklin & Lewin, 2003). En sentido amplio, se puede señalar que los intervalos temporales con mayor frecuencia de crecidas se producen durante periodos de transición hacia un enfriamiento global, como se pone de manifiesto en la comparación (Fig. 3) entre las paleocrecidas registradas en diferentes cuencas españolas (Benito & Thorndycraft, 2005) y la curva de sedimentos transportados por icebergs en el Atlántico Norte (Bond *et al.*, 2001). Sin embargo, esta afirmación necesita de un análisis más detallado debido a que a nivel regional los cambios globales como la PEH definidos para el norte del área Atlántica presentan inconsistencias especialmente en relación a su inicio, duración y efectos en dife-

rentes zonas de Europa (Hughes & Diaz, 1994). De hecho, las fuentes documentales históricas ponen en evidencia las manifestaciones de fuerte variabilidad climática presentes durante la PEH, con momentos de incremento en la frecuencia de las inundaciones catastróficas, pero también incrementos en la frecuencia de aparición de sequías prolongadas de carácter climático, cada uno de ellos en periodos que se prolongan entre 30 y 40 años. Igualmente, uno de los episodios más fríos durante la PEH coincide con un periodo con pocas manchas en la fotosfera solar, conocido como “Mínimo de Maunder” (1675-1715 AD), durante el cual se ha descrito un incremento en la circulación meridional sobre Europa (Kington, 1994) que causó una situación climatológica muy variable, con contrastes importantes en un periodo breve de tiempo (Pfister & Bareiss, 1994; Borisenkov, 1994). Durante el “Mínimo de Maunder” las cuencas Atlánticas mostraron cambios en la frecuencia de crecidas con alternancia de decenios (Benito *et al.*, 1996), con importantes crecidas alternando con periodos relativamente secos (Alvárez Vázquez, 1986). En los ríos mediterráneos se han descrito igualmente diferentes fases con incremento en la frecuencia de crecidas registradas documentalmente, como las ocurridas en el río Llobregat entre 1570-1630, 1760-1800 y 1840-1870 AD (Llasat *et al.*, 2003).

En relación con los registros procedentes de llanuras aluviales, las dataciones recopiladas apuntan a dos periodos de aluvionamiento ocurridos entre 1800-2350 cal. BP y 800-500 cal. BP. El primero coincide con el evento climático del 2850 BP (van Geel *et al.*, 1998), y aparece representado en el registro de paleocrecidas. El segundo periodo se produce entre las dos fases con incremento en la frecuencia de crecidas ocurridas en el último milenio (Fig. 3). Los gráficos de probabilidad de las dataciones de radiocarbono de muestras que reflejan cambios en la sedimentación indican que el periodo de aluvionamiento resulta más difuso que las dataciones de los periodos con paleocrecidas. Las dataciones realizadas en posiciones intermedias de las secuencias correspondientes a llanuras de inundación muestran que el inicio de la sedimentación se produce antes del 800 cal. BP, probablemente en relación a la fase de aumento de crecidas ocurrida entre 1000 y 800 cal. BP. Por

otro lado, la datación más temprana correspondiente a la fase de aluvionamiento post-Romano corresponde al 1350-1150 cal. BP (Fig. 2B). Tal y como señala Butzer (1980), la cronología del aluvionamiento parece ser una variable ligada en numerosos casos a los cambios de uso del suelo a escala local. De cualquier forma, la mayor parte de los datos existentes apuntan a que la principal fase de aluvionamiento en las llanuras aluviales de los grandes ríos españoles se produce con posterioridad al año 1000, aunque resulta evidente la falta de datos concluyentes al respecto. En relación con las tasas de sedimentación fluvial durante la PEH, los datos existentes señalan hacia un incremento de la sedimentación para el periodo comprendido entre 1000 y 500 años BP. En el caso del Guadalquivir la tasa de migración alcanza 2.280 m²/año y la tasa media de sedimentación es de 1.2 m/año, tres veces superior a la registrada durante el primer milenio de nuestra era (Uribelarrea & Benito, en prensa).

5. Conclusiones

Los registros fluviales muestran una elevada sensibilidad a los cambios tanto climáticos como ambientales. En los últimos 3000 años se han registrado tres fases principales de incremento en la frecuencia de las paleocrecidas en los periodos 2850-2500 cal. BP, 1000-800 cal. BP y 520-250 cal. BP. El análisis detallado utilizando los perfiles con dataciones múltiples permite acotar estos periodos de paleocrecidas a 1000-1200 AD, 1430-1685 AD y 1730-1810 AD. Este patrón general de la distribución de las crecidas desde el año 1000 AD ha sido corroborado por los registros históricos que muestran dos fases con incremento de la frecuencia de las crecidas (1150-1290 AD y 1500-1850 AD) separados por un periodo con una reducción significativa de los eventos entre 1290-1400 AD (Benito *et al.*, 1996).

En líneas generales estos periodos parecen coincidir con momentos de transición hacia periodos donde se produce una intensificación de las condiciones climáticas, como son el Mínimo de Maunder (1675-1715 AD), e incluso coincidente con periodos de condiciones frías

como el Mínimo de Dalton (1795-1830) y el evento climático del 2850 BP. Estos resultados muestran que los depósitos de paleocrecidas presentan un elevado potencial para proporcionar una señal climática dentro del registro fluvial incluso durante periodos de intenso impacto antrópico en el modelado.

El registro de las secuencias aluviales indica que las primeras dataciones de radiocarbono que post-datan el periodo Romano corresponden con edades comprendidas entre 1350 y 1150 cal. BP. En los registros aluviales se han realizado un número significativamente menor de dataciones que las efectuadas en registros de paleocrecidas, por lo que la cronología no aparece bien definida. Sin embargo, existen evidencias de que el aluvionamiento en las llanuras aluviales se produjo durante los siglos XIV y XV, que coincide con un periodo de disminución en la frecuencia de crecidas.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el *International Council for Science (ICSU)* proyecto "Past hydrological events related to understanding global change". Los autores agradecen a Mark Macklin y Eric Johnstone (Universidad de Gales, Aberystwyth) por su aportación en el desarrollo metodológico presentado en este trabajo, y que procede de su experiencia del análisis del registro fluvial del Reino Unido. Igualmente, agradecemos la información adicional sobre dataciones de radiocarbono inéditas proporcionadas por Mayte Rico (CSIC, Madrid), Dave Passmore (University of Newcastle) y Jose Ortega (Universidad Europea de Madrid).

Referencias bibliográficas

- Allen, J.R.M., Huntley, B. & Watts, W.A. (1996): The vegetation and climate of north-west Iberia over the last 14,000 years. *Journal of Quaternary Science*, 11: 125-147.
- Alonso, A. & Garzón, G. (1996): The Jarama River. En Benito, G. Pérez-González, A., Machado, M.J. & Alba, S. de (Eds.): *Palaeohydrology in Spain: Field Excursion*

- Guide*, Second International Meeting on Global Continental Palaeohydrology, GLOCOPH '96, 21-34.
- Álvarez Vázquez, J.A. (1986): Drought and Rainy Periods in the Province of Zamora in the 17th, 18th and 19th centuries. En López Vera, F. (Ed.): *Quaternary Climate in Western Mediterranean*, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, 221-233.
- Baker, V. R. (1987): Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96: 79-99.
- Baker, V.R. & Kochel, R.C. (1988): Flood sedimentation in bedrock fluvial systems. En Baker, V.R., Kochel, R.C. & Patton, P.C. (Eds.): *Flood Geomorphology*, Wiley, USA, 123-137.
- Baker, V.R., Webb, R.H. & House, P.K. (2002): The Scientific and societal value of paleoflood hydrology. En House, P.K., Webb, R.H., Baker, V.R. & Levish, D.R. (Eds.): *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*, Water Science and Application Series, Vol. 5, 127-146.
- Ballais, J.L. (1995): Alluvial Holocene terraces in eastern Maghreb: climate and anthropogenic controls. En Lewin, J., Macklin, M.G. & Woodward, J.C. (Eds.): *Mediterranean Quaternary River Environments*, Rotterdam, Balkema, 183-194.
- Barriandos, M. (1995): La climatología histórica en el estudio de los riesgos climáticos. El episodio de noviembre de 1617 en Catalunya. En Creus, J. (Ed.): *Situaciones de riesgo climático en España*, Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC), Jaca, 73-83.
- Barriandos, M. & Martín Vide, J. (1998): Secular Climatic Oscillations as Indicated by Catastrophic Floods in the Spanish Mediterranean Coastal Area (14th-19th Centuries). *Climatic Change*, 38: 473-491.
- Benito G. & Thorndycraft, V.R. (Eds.) (2004): *Systematic, palaeoflood and historical data for the improvement of flood risk estimation*, CSIC, Madrid, 115 pp.
- Benito, G. & Thorndycraft, V. R. (2005). Palaeoflood hydrology and its role in applied hydrological sciences. *Journal of Hydrology*, 313(1-2): 3-15.
- Benito; G., Machado, M.J. & Pérez-González, A. (1996): Climate change and flood sensitivity in Spain. En Branson, J., Brown, A.G. & Gregory, K.J. (Eds.): *Global continental changes: the context of palaeohydrology*, Geological Society Special Publication, 115, 95-98.
- Benito, G., Sopena, A., Sánchez-Moya, Y., Machado, M.J. & Pérez-Gonzalez, A. (2003a): Palaeoflood record of the Tagus River (Central Spain) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 22: 1737-1756.
- Benito, G., Díez-Herrero, A. & Fernández de Villalta, M. (2003b): Magnitude and frequency of flooding in the Tagus Basin (Central Spain) over the last millennium. *Climatic Change*, 58: 171-192.
- Benito, G., Barriandos, M., Llasat, C., Machado, M. & Thorndycraft, V. R. (2005): Impactos sobre los riesgos naturales de origen climático. En Moreno, J.M. (Coord.): *Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del Cambio Climático*, Ministerio de Medioambiente, 527-548.

- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. & Bonani, G. (2001): Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294: 2130-2136.
- Borisenkov, Y. (1994): Climatic and other Natural Extremes in the European Territory of Russia in the Late Maunder Minimum (1675-1715). En Frenzel, B. (Ed.): *Climatic Trends and Anomalies in Europe, 1675-1715*, Gustav Fischer, Stuttgart, 83-94.
- Bronk Ramsey, C. (2000): *OxCal Program v. 3.5: the manual*, 103 pp.
- Burjachs, F., Giralt, S., Roca, J.R., Seret, G. & Juliá, R. (1997): Palinología Holocénica y desertización en el mediterráneo occidental. En Ibáñez, J.J., Valero Garcés, B.L. & Machado, C. (Eds.): *El paisaje mediterráneo a través del espacio y del tiempo. Implicaciones en la desertificación*, Geoforma ediciones, Logroño, 379-394.
- Butzer, K.W., Miralles, I. & Mateu, J.F. (1983) : Las crecidas medievales del río Júcar según el registro geoarqueológico de Alzira. *Cuadernos de Geografía*, 32-33: 311-332.
- Butzer, K.W. (1974): Accelerated soil erosion. En Manners, I. & Mikesell, M.W. (Eds.): *Perspectives on Environment*, Association of American Geographers, Washington D.C., 57-78.
- Butzer, K.W. (1975): Pleistocene littoral-sedimentary cycles of the Mediterranean Basin: a Mallorquin view. En Butzer, K.W. & Isaac, G.L. (Eds.): *After the Australopithecines*, Mouton, The Hague, 25-71.
- Butzer, K.W. (1980): Holocene alluvial sequences: Problems of dating and correlation. En Cullingford, R.A., Davidson, D.A. & Lewin, J. (Eds.): *Timescales in Geomorphology*, John Wiley & Sons Ltd., 131-142.
- Calmel-Avila, M. (2000): Procesos hídricos holocenos en el bajo Guadalentín (Murcia, SE España). *Cuaternario y Geomorfología*, 14: 65-78.
- Calmel-Avila, M. (2002): The Librilla "rambla", an example of morphogenetic crisis in the Holocene (Murcia, Spain). *Quaternary International*, 93-94: 101-108.
- Camuffo, D. & Enzi, S. (1992): Reconstructing the Climate of Northern Italy from Archive Sources. En Bradley, R.S. & Jones, P.D. (Eds.): *Climate Since A.D. 1500*, Routledge, London, 143-154.
- French, C. & Passmore, D.G. (1998): Detailed geomorphological and micromorphological analysis of the Barranco de Gatas, the Rambla Ancha and Gatas settlement. En Castro, P.V. et al. (Eds.): *Agua Project; palaeoclimatic reconstruction and the dynamics of human settlement and land-use in the area of the middle Aguas (Almería), in the south-east of the Iberian Peninsula*, Report to the European Commission, Environment and Climate Programme, Luxembourg, 45-49.
- Grove, A.T. (2001): The "Little Ice Age" and its geomorphological consequences in Mediterranean Europe. *Climatic Change*, 28: 121-136.
- Grove, J.M. (1988): *The Little Ice Age*. Methuen, London. 498 pp.
- Gutiérrez Elorza, M. & Peña, J.L. (1998): Geomorphology and late Holocene climatic change in Northeastern Spain. *Geomorphology*, 23: 205-217.

- Harvey, A.M. & Wells, S.G. (1987): Response of Quaternary fluvial systems to differential epeirogenic uplift: Aguas and Feos river systems, southeast Spain. *Geology*, 15: 689-693.
- Hughes, M.K. & Diaz, H.F. (Eds.) (1994): *The Medieval Warm Period*, Kluwer, Dordrecht, 342 pp.
- Hydrologic Engineering Center (1995): *HEC-RAS, River Analysis System, Hydraulics Reference Manual*, (CPD-69), Davis, California.
- Johnstone, E., Macklin, M.G & Lewin, J. (en prensa): Holocene river dynamics and flooding in Great Britain: Evaluating regional responses to climate and land-use change. *Catena*.
- Kington, J. (1994): Synoptic Weather Mapping, 1675 to 1715. En Frenzel, G. (Ed.): *Climatic Trends and Anomalies in Europe, 1675-1715*, Gustav Fischer, Stuttgart, 205-224.
- Lamb, H. H. (1977): *Climate: Present, Past, and Future. Vol. 2, Climatic History and the Future*, Methuen, 463 pp.
- Lewin, J. & Macklin, M.G. (2003): Preservation potential for Late Quaternary alluvium. *Journal of Quaternary Science*, 18: 107-120.
- Lewin, J., Macklin, M.G. & Woodward, J.C. (1995): Mediterranean Quaternary River Environments - Some future research needs. En Lewin, J., Macklin, M.G. & Woodward, J.C. (Eds): *Mediterranean Quaternary River Environments*, Rotterdam, Balkema, 283-284.
- Llasat, M.C., Barriendos, M., Barrera, A. & Rigo, T. (2003): Climatological analysis of flood frequency in the Ter, Segre and Llobregat basins from the 14th to 20th century. En Thorndycraft, V.R., Benito, G., Barriendos, M. & Llasat, M.C. (Eds.): *Palaeofloods, historical data and climatic variability: applications in flood risk assessment*, CSIC, Madrid, 275-280.
- Llasat, M.C., Rigo, T. & M. Barriendos (2005): Floods in Catalonia (NE Spain) since the 14th century. Climatological and meteorological aspects from historical documentary sources and old instrumental records. *Journal of Hydrology*, 313: 32-47.
- Macklin, M.G. & Lewin, J. (2003): River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change. *Journal of Quaternary Science*, 18: 101-105.
- Macklin, M.G., Lewin, J. & Woodward, J.C. (1995): Quaternary fluvial systems in the Mediterranean basin. En Lewin, J., Macklin, M.G. & Woodward, J.C. (Eds): *Mediterranean Quaternary River Environments*, Rotterdam, Balkema, 1-25.
- Ortega, J.A. & Garzón, G. (2003): Palaeohydrology of the Lower Guadiana River basin. En Thorndycraft, V.R., Benito, G., Barriendos, M. & Llasat, M.C. (Eds.): *Palaeofloods, historical data and climatic variability: applications in flood risk assessment*, CSIC, Madrid, 33-38.
- Pfister, C. & Brázdil, R. (1999): Climatic Variability in Sixteenth-Century Europe and its Social Dimension: A Synthesis. *Climatic Change*, 43: 5-53.
- Pfister, C. & Bareiss, W. (1994): The climate in Paris between 1675 and 1715 accor-

- ding to the meteorological journal of Louis Morin'. En Frenzel, B. (Ed.): *Climatic Trends and Anomalies in Europe, 1675-1715*, Gustav Fischer, Stuttgart, 151-172.
- Pfister, C., Schwarz-Zanetti, G., Hochstrasser, F. & Wegmann, M. (1996): Winter Severity in Europe: the Fourteenth Century. *Climatic Change*, 34: 91-108.
- Porter, S.C. (1986): Pattern and forcing of Northern Hemisphere glacier variations during the last millennium. *Quaternary Research*, 26: 27-48.
- Rico, M. (2004): *Las paleocrecidas en la cuenca media del Río Segre durante el Pleistoceno superior-Holoceno: registros morfosedimentarios y análisis hidrológico*, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 398 pp.
- Riera, S., Wansard, G. & Juliá, R. (2004): 2000-year environmental history of a karstic lake in the Mediterranean Pre-Pyrenees: the Estanya lakes (Spain). *Catena*, 55: 293-324.
- Rumsby, B.T. & Macklin, M.G. (1996): River response to the last neo-glacial (the "Little Ice Age") in Northern, Western and Central Europe. En Branson, J., Brown, A.G. & Gregory, K.G. (Eds.): *Global Continental Changes: The Context of Palaeohydrology*, Special Publication No. 115, Geological Society, London, 217-233.
- Santos, L., Vidal Ramoni, J.R. & Jalut, G. (2000): History of vegetation during the Holocene in the Courel and Queixa Sierras, Galicia, northwest Iberian Peninsula. *Journal of Quaternary Science*, 15: 621-632.
- Schulte, L. (2002): Climatic and human influence on river systems and glacier fluctuations in southeast Spain since the Last Glacial Maximum. *Quaternary International*, 93-94: 85-100.
- Schulte, L. (2003): River-response and terrace aggradation in the Mediterranean Iberian Peninsula during historical times. En Thorndycraft, V.R., Benito, G., Barriendos, M. & Llasat, M.C. (Eds.): *Palaeofloods, historical data and climatic variability: applications in flood risk assessment*, CSIC, Madrid, 67-72.
- Schumm, S.A. (1977): *The fluvial system*, New York, Wiley, 338 pp.
- Thorndycraft V.R. & Benito G. (en prensa, a): The fluvial response to Holocene environmental changes in Spain: Evidence from a newly compiled radiocarbon database. *Catena*.
- Thorndycraft, V.R. & Benito, G. (en prensa, b): The Holocene fluvial chronology of Spain: evidence from a newly compiled radiocarbon database. *Quaternary Science Reviews*.
- Thorndycraft, V.R., Benito G., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopena A. & Casas, A. (2004): A Late Holocene palaeoflood record from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Journal of the Geological Society of India*, 64: 549-559.
- Thorndycraft, V.R., Benito G., Rico, M., Sánchez-Moya, Y., Sopena A. & Casas, A. (2005): A long-term flood discharge record derived from slackwater flood deposits of the Llobregat River, NE Spain. *Journal of Hydrology*, 313: 16-31

- Uribelarrea D. & Benito G. (en prensa): Fluvial changes of the Guadalquivir river during the Holocene in Córdoba (S. Spain). *Geomorphology*.
- van Geel, B., Van der Plicht, J., Kilian, M.R., Klaver, E.R., Kouwenberg, J.H.M. Ressen, H., Reynaud-Farrera, I. & Waterbolk, H.T. (1998): The sharp rise of $\delta^{14}C$ at ca. 800 cal. BC. Possible causes, related climatic teleconnections and the impact on human environments. *Radiocarbon*, 40: 335-350.
- Vita-Finzi, F. (1969): *The Mediterranean valleys: geological changes in historical times*, Cambridge University Press, Cambridge, 140 pp.
- Vita-Finzi, F. (1976): Diachronism in Old World alluvial sequences. *Nature*, 263: 218-219.
- Webb, R.H. & Jarrett, R.D. (2002): One-dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods. En House, P.K., Weeb, R.H., Baker, V.R. & Levish, D.R. (Eds.): *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and Applications of Paleoflood Hydrology*, Water Resources Monograph 5, AGU, Washington, D.C., 111-125.