

Efectos sedimentarios de las inundaciones en un río fuertemente antropizado: El Jarama, Madrid

A. ALONSO* y G. GARZÓN**

* Universidad de La Coruña, Facultade de Ciencias,
Campus da Zapateira, 15071 A Coruña, España.

** Facultad de Cc. Geológicas, Universidad Complutense,
28040 Madrid. España.

RESUMEN

Las inundaciones constituyen siempre situaciones de alto stress dentro de la dinámica natural de un río, pero si las condiciones de este han sido modificadas debido a la acción antrópica, las respuestas, tanto de tipo erosivo como sedimentario se ven aún mas alteradas y potenciadas. El río Jarama discurre muy cerca de la ciudad de Madrid, por lo que ha sufrido unas modificaciones importantes en las últimas décadas. Estas modificaciones han dado lugar a la pérdida de caudal líquido (Ql) y a la de caudal sólido (Qs), es decir, su carga, que es fundamentalmente de gravas.

Las respuestas sedimentarias de este sistema modificado, en los momentos de avenida, han sido de dos tipos: Efectos erosionales (encajamientos del cauce, erosiones en la llanura de inundación y erosiones en las orillas por deslizamientos rotacionales) y Efectos sedimentarios (barras de chute, malecones, lagos de oxbow, modificaciones en las barras por lavados y recrecimientos y desbordamientos en la llanura de inundación y en las graveras marginales). En el presente trabajo se describen algunos ejemplos de los efectos, tanto erosivos como sedimentarios, en zonas del río muy modificadas antrópicamente, y se comparan con el comportamiento del río en condiciones poco modificadas.

Palabras clave: Inundaciones, erosión canales, sedimentación llanura de inundación, cambios antrópicos, graveras, río meandriforme.

ABSTRACT

Floods represent a high stress situation within natural river dynamic. Under anthropic modified conditions, erosional and sedimentary channel changes are improved. Due to its neighbourhood to Madrid, the Jarama river suf-

ferred serious changes in the last decades, reflected in loss of discharge and load, mainly composed of gravels. River response has been both erosional and aggradational. Erosive effects consists of channel incision and floodplain and bank erosion, this last one in the form of slumps. Sedimentation occurs as chute bars, levees, oxbow lakes, outwash and enlargement of channel bars and overbank deposition in floodplain as well as in gravel pits. Both type examples are described for anthropic stongly modified reaches and compared to river response under more natural conditions.

Key words: Floods, bank erosion, floodplain sedimentation, anthropic changes, gravel pits, meandering river.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El río Jarama es un afluente del Tajo, que corre de norte a sur, pasando muy cerca de la ciudad de Madrid, por lo que ha sufrido durante décadas la fuerte presión antrópica que supone una población de cuatro millones de habitantes. Generalmente se ha hecho un uso inadecuado del río, que se ha traducido en modificaciones de las orillas, embalses, construcciones en la llanura de inundación, puentes e importante actividad extractiva de gravas, tanto en su llanura de inundación como en el propio cauce.

En el río Jarama, las inundaciones que corresponden a un período de recurrencia de diez años no han tenido apenas efectos catastróficos hasta muy recientemente, cuando las condiciones han sido muy modificadas. En Diciembre de 1989 el río sufrió una crecida de esas características, y las pérdidas económicas fueron muy cuantiosas. Una aproximación a los efectos sedimentarios de esta inundación en el tramo del río que corre a la altura de la ciudad de Madrid, así como la influencia de las modificaciones antrópicas en la dinámica del mismo fueron estudiadas por Garzón et al (1990) y Garzón et al (1992).

La principal alteración antrópica es la pérdida de carga del río debido a la extracción intensiva de las gravas que constituyen su caudal sólido. Las graveras se multiplicaron en los años sesenta para la construcción de Madrid, en un momento en que la importante emigración desde el campo provocó una intensa demanda de nuevas viviendas. Por añadidura, no existía ninguna planificación para las extracciones, por lo que las graveras se extienden a lo largo de todo el valle, afectando tanto a la llanura de inundación como al cauce y a los afluentes.

El efecto principal de esta pérdida de carga ha sido un encajamiento general del río, que en algunos tramos sobrepasa los 3 metros. Lógicamente, los efectos sedimentarios de las inundaciones han sufrido también cambios. El propósito de este trabajo es analizar los efectos sedimentarios de una inunda-

ción de recurrencia diez años, y otra posterior de menor entidad, comparando el comportamiento del río en condiciones naturales, con las modificadas. Se ha elegido el tramo medio del río, que comprende la sección que va desde su entrada en la cuenca terciaria del Tajo hasta su confluencia con el Henares, al sur de la ciudad de Madrid (Fig. 1). Las razones son que los efectos sedimentarios de la inundación de 1989, y la menor de 1991, fueron en este tramo mas importantes que en el tramo bajo del río, las modificaciones antrópicas son mas importantes, y, además, no está afectado por el aporte de ningún afluente importante.

METODOLOGÍA

Se ha basado en el análisis detallado y comparativo de las fotografías aéreas disponibles. Estas han sido: un vuelo de 1947 y otro de 1956, que han servido para estudiar la situación del río en unas condiciones todavía no demasiado alteradas, así como las características morfológicas y dinámicas (barras activas, etc) y el comportamiento en las avenidas. Para esto último ha sido especialmente interesante el vuelo de 1956, que muestra claramente los efectos de una avenida reciente. Otro vuelo de 1988 muestra las intensas modificaciones antrópicas sufridas por el río en las décadas de los 60 a los 80. Por último, se dispuso en algunos tramos de fotos fechadas en 1990 ó 1991, que muestran los efectos de la última inundación estudiada.

Los efectos de esta inundación, siempre que fue posible, se estudiaron sobre el terreno. Las observaciones se realizaron a lo largo de los meses siguientes a la inundación, cuando todavía muchas de las formas sedimentarias se conservaban relativamente bien. Se efectuaron entonces medidas directas de las formas, dimensiones, tipos de estratificación, trazado de las líneas de flujo principales, etc. El mismo trabajo se llevó a cabo después de la ocurrencia de otra avenida, esta mucho menos importante, ocurrida en la primavera de 1991.

Estas observaciones se complementaron con un vuelo a baja altura para reconocer los efectos sedimentarios desde el aire. Desgraciadamente, el vuelo solo pudo realizarse sobre la zona norte del tramo del río comprendido en el estudio, ya que la presencia del aeropuerto de Barajas impidió la obtención del permiso de sobrevolar toda la zona sur.

CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS E HIDROLÓGICAS

El Jarama es uno de los principales ríos de la Comunidad de Madrid, a la cual recorre de norte a sur. Nace en el Sistema Central, entre las sierras de Guadarrama y Somosierra, a 2000 metros de altitud y, tras un recorrido de

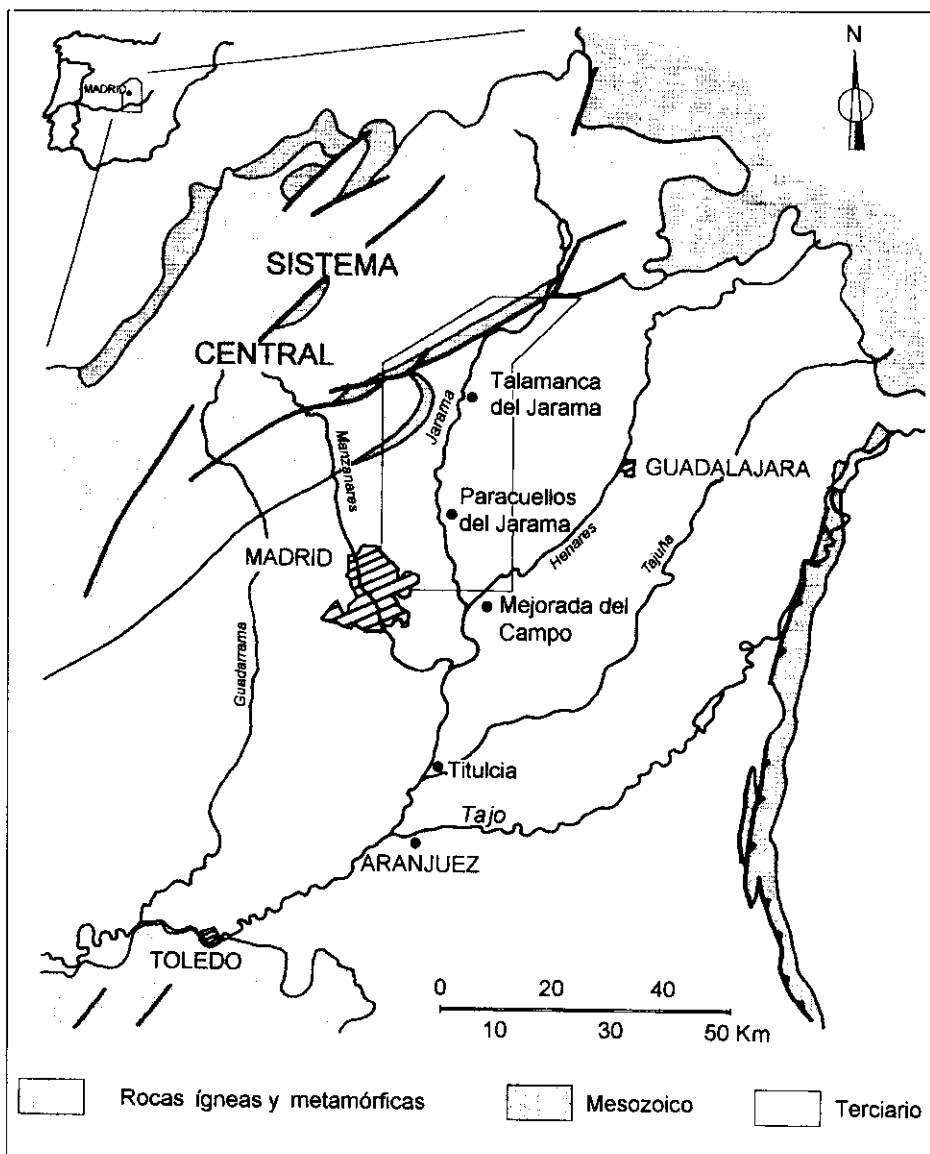


Fig. 1.—Situación del tramo estudiado.

Fig. 1.—Location of the studied reach.

150 Km., desemboca en el Tajo a una cota de unos 600 metros, después de haber recibido las aguas de cinco tributarios, el Lozoya, el Guadalix y el Manzanares por su margen derecha, y los ríos Tajuña y Henares por su margen izquierda.

Fue caracterizado como un río meandriforme de gravas por Arche (1983), quien estudió sus terrazas medias, y posteriormente por Garzón *et al.* (1990) y (1992), quienes estudiaron al río actual. En las fotografías aéreas disponibles de 1947 y 1956 se puede medir una sinuosidad en el tramo estudiado de 1,51, lo que, en efecto, lo sitúa en el grupo de ríos de alta sinuosidad. Su carga es fundamentalmente gruesa, gravas sobre todo y arenas arcólicas, por lo que sus meandros son típicamente abiertos, con barras de punta de gravas y algunas barras centrales y sobre todo laterales adosadas, es por tanto una morfología intermedia entre ríos braided y meandriformes, como el tipo 1 de Miall (1985) en su clasificación de ríos meandriformes. La carga de fondo del río proviene de sus fuentes en una cierta medida, pero mayoritariamente de aportes laterales, abanicos en los laterales del valle por el que discurre y arroyos intermitentes que aportan gravas de las terrazas del propio Jarama.

A lo largo del Cuaternario el río ha sufrido una sucesión de etapas de agradación alternando con otras de degradación o encajamiento, que han dado lugar a la existencia de hasta 14 niveles de terrazas, la mas alta de las cuales está a una cota de 150 metros sobre el nivel del río actual. Las etapas agradantes nunca fueron muy importantes, y las terrazas que se conservan muestran potencias de 7 metros de media, excepto la etapa correspondiente al Pleistoceno medio, donde se produjeron fenómenos de convergencia, por lo que se conserva una serie de hasta 20 metros de potencia (Pérez González, 1980a y b). Las etapas de degradación, por el contrario, han dado lugar a un amplio valle con estrechos afloramientos de terrazas colgadas de escaso desarrollo. El estudio de las mismas demuestra que, con algunas variaciones, el río siempre ha tenido hábito meandriforme, con carga gruesa (Alonso y Garzón, 1994). Las variaciones se manifiestan, sobre todo, en que la carga del río parece ser progresivamente mas gruesa, como si estuviera reelaborando sus propios sedimentos, eliminando las arenas y concentrando cada vez mas las gravas. Sus características básicas, morfológicas y sedimentarias, sin embargo, han sido en general bastante constantes hasta al menos 1947, como se aprecia en las fotos aéreas de ese año.

Entre 1947 y 1956 se observan algunos ligeros cambios, quizás una rectificación del río, pero poco notables. El cambio espectacular se produce entre las fotos del 56 y las del 88 (Garzón y Alonso, 1995). De forma resumida se observa: Disminución de la anchura del río en situación de aguas bajas, cese de la actividad de las barras, laterales, centrales y de punta; revegetación de las mismas; encajamiento general del río con magnitudes entre 2,5 y 3,5 metros en algunos tramos. Se produjo también el endereza-

miento general de río, que ha pasado a tener una sinuosidad media del tramo de 1,31, y se han producido numerosas cortas de meandros y desplazamientos laterales del cauce. En resumen, a duras penas conserva restos de sus antiguas características morfológicas. Todos estos cambios han sido originados por las modificaciones introducidas recientemente por el hombre, sobre todo la extracción de gravas, que ha originado una grave pérdida de carga sólida en el sistema.

Los datos hidrológicos del río Jarama, como los de la totalidad de los ríos de la Comunidad de Madrid, son bastante limitados. Se tienen datos elaborados de dos estaciones de aforo en el tramo estudiado, que muestran los caudales instantáneos máximos entre los años 1970 y 1986 (Fig. 2). La extrapolación realizada considerando los datos del siglo, y teniendo en cuenta que en 1989 (19/12/89) la lámina de agua alcanzó una altura de 4,1 metros sobre el nivel de «bankfull» del río, permite asignarle un caudal de

$$Q_{\max} \text{ Instantáneo} = 430 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

correspondiente a un período de recurrencia de 10 años (Garzón *et al.*, 1993). Esto coincide plenamente con los testimonios de los habitantes de la zona. La crecida de Marzo de 1991 no sobrepasó la altura de 1,4 metros sobre el nivel de «bankfull».

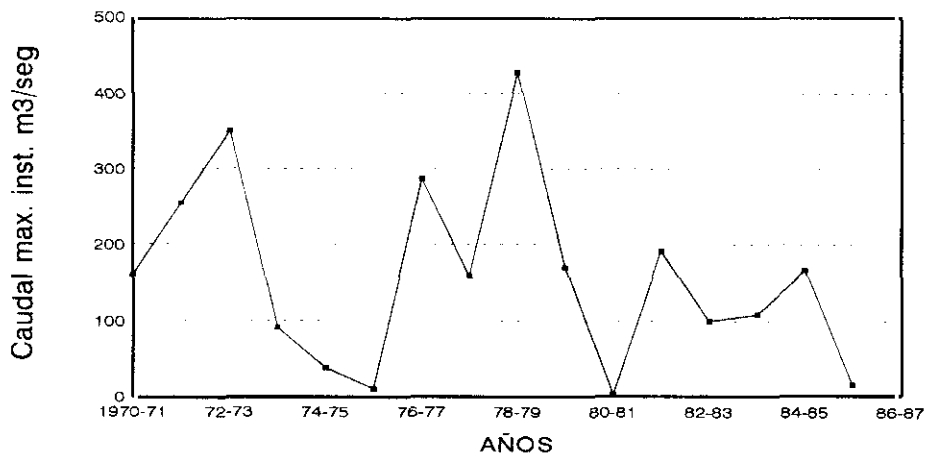


Fig. 2.—Datos de aforos. Caudal máximo instantáneo anual del río Jarama en Algete.
Fig. 2.— Gauging data. Maximum annual discharge for the Jarama River in Algete.

PRINCIPALES ACTUACIONES ANTRÓPICAS Y CAMBIOS MORFOGENÉTICOS EN EL RÍO

El río Jarama discurre muy cerca de la ciudad de Madrid, por lo que la presión antrópica sobre su valle y su cauce ha sido muy importante. El hecho de que sus terrazas estén mayoritariamente formadas por gravas, y que durante las décadas del desarrollismo español, la emigración del campo hacia la ciudad fuera tan grande, hizo que proliferaran de forma masiva e indiscriminada las explotaciones de áridos dedicadas a la construcción de una ciudad en pleno desarrollo. Por ello, las actuaciones en el río, tanto en la llanura de inundación como en el propio cauce, han sido muchísimas durante las décadas de los 60 a los 90, y todavía continúan hoy día. Estas actuaciones son de diversos tipos, construcciones y extracciones, malecones y vados, etc, aunque sin duda, las que mayor influencia han tenido en la dinámica del río han sido las extracciones de gravas, realizadas tanto en la llanura de inundación como en el cauce y en los afluentes laterales que aportaban gravas y arenas al río. Esto ha supuesto una importante pérdida de carga en el río, que ha originado un fuerte desequilibrio dinámico e iniciado un proceso acelerado de erosión y encajamiento.

Han sido explotadas (y todavía están siendo hoy día, aunque de forma mas ralentizada, y con una cierta «planificación y control»), las gravas de la llanura de inundación —terrazza baja, un nivel de gravas de potencia variable, entre 0,5 y 10 metros, con una media de 4 metros. La mayor parte de las explotaciones se realizan a unos metros del cauce, por lo que generalmente se construye un dique artificial de echadizo para protección, que muchas veces se aprovecha en su parte superior como camino. En ocasiones se utiliza como dique simplemente la franja de terreno no explotada que bordea la orilla. La abundancia de gravas en la carga de fondo del río hizo que hasta hace poco tiempo se explotaran directamente también las del cauce. Esta práctica ha cesado, sencillamente porque —según las palabras de un graverero— «el río ya no trae gravas cada año, como antes». Las gravas de los arroyos laterales y abanicos, las principales fuentes de alimentación del río, han sido también explotadas. Los aportes son hoy día mínimos.

La pérdida de carga sólida del río ha desencadenado los otros efectos de importancia: aumento de su capacidad erosiva, fuertes erosiones remontantes aguas arriba de las extracciones y enderezamiento general del río, sobre todo por corta de meandros. El encajamiento del río es general, siendo en algunos puntos de hasta 3,5 metros respecto a su situación en los 40.

Otras modificaciones antrópicas y sus efectos son los siguientes:

Los embalses aguas arriba (Fig. 3), que restan caudal líquido en condiciones normales, con lo cual se produce la disminución de la actividad del canal, con revegetación de las barras y reducción del cauce mayor del río. Estos embalses, en el río Jarama, no tienen un papel importante como laminadores de las avenidas.

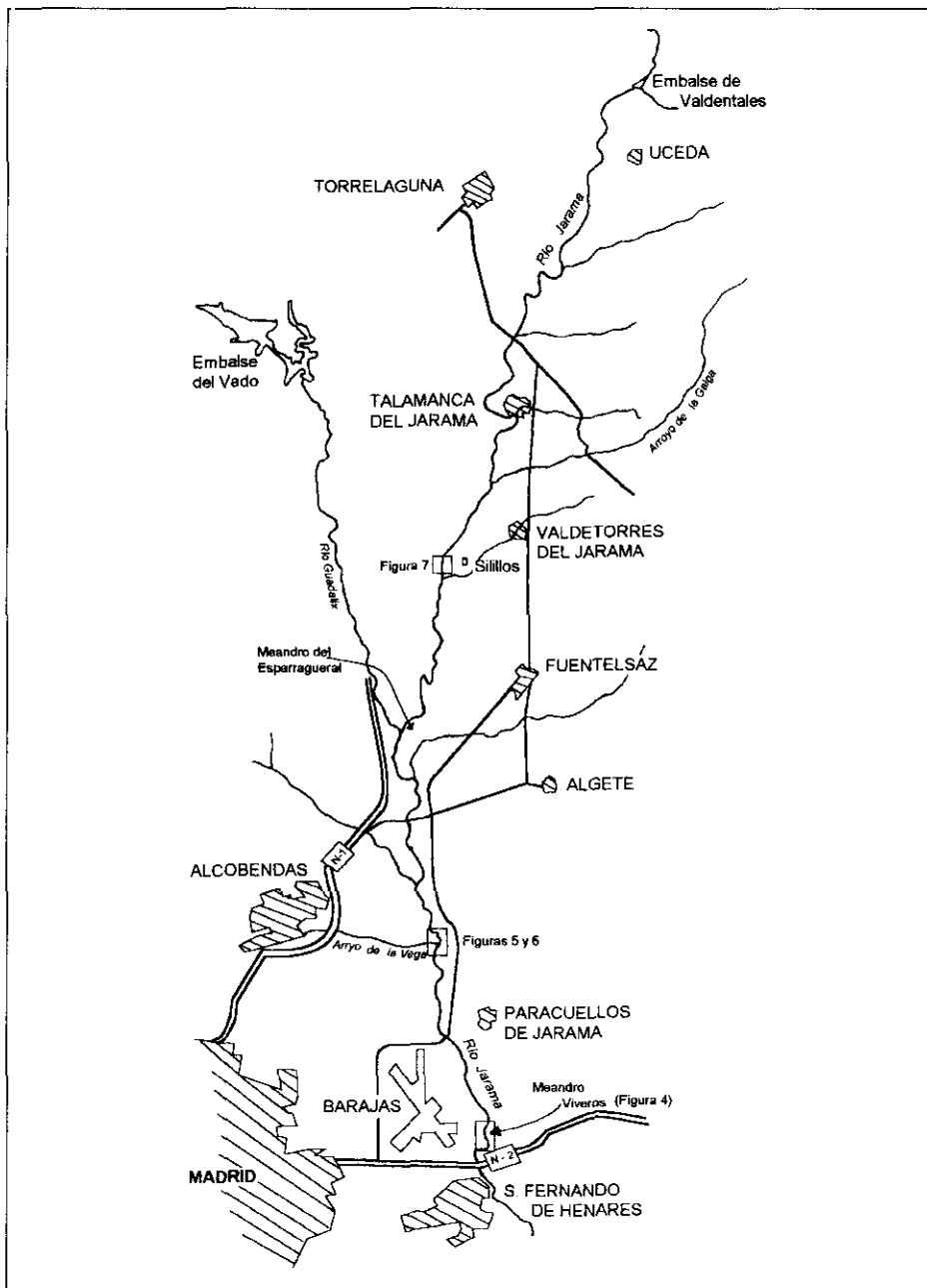


Fig. 3.—Principales localidades mencionadas en el texto y situación de las figuras.
 Fig. 3.—Main localities mentioned in the text and situation of figures

Los malecones artificiales y obras de defensa limitan la actividad natural del río, constriñendo su cauce e impidiendo su migración. Se produce, así, mayor velocidad del agua y efectos erosivos mayores. El problema de desbordamiento que tratan de combatir se traslada aguas abajo, muchas veces a zonas donde normalmente no se provocaría. Los vados sin desagüe y las pequeñas represas tienen efectos similares.

Por último, las construcciones en la llanura de inundación suponen por un lado un riesgo de pérdidas en caso de crecida, por otro son obstáculos en el camino normal del flujo, por lo que se producen socavaciones amplificadas y desagües anómalos. Todas estas actuaciones y sus efectos tienen su respuesta en el comportamiento sedimentario del río, y, sobre todo en los momentos de avenida, que se puede considerar situaciones críticas en la dinámica natural del río.

DINÁMICA SEDIMENTARIA DEL RÍO. EFECTOS

Los cambios morfogenéticos producidos en el río han cambiado su dinámica sedimentaria, especialmente durante las avenidas. La pérdida de caudal sólido se traduce en un aumento de la capacidad erosiva del río, y, por su parte, la rectificación del canal, en un aumento de la velocidad de la corriente. En consecuencia, durante las crecidas se produce una destrucción masiva de diques y malecones, y la invasión de las zonas ocupadas por el hombre. El principal efecto, es, por tanto, la erosión. Esta se produjo de diversas maneras, fundamentalmente por cortas de meandros, deslizamientos rotacionales, surcos en la llanura de inundación y en el cauce y erosión difusa en la llanura. También hay que considerar la destrucción de obras humanas, diques y malecones principalmente.

Las zonas de sedimentación y las formas sedimentarias también fueron modificadas. Los principales efectos fueron la reutilización de surcos de meandro, la removilización de barras, los malecones naturales, los crevasses o lóbulos de derrame en la llanura, la sedimentación en lagos «oxbow», y, sobre todo, la sedimentación en graveras abandonadas, que actuaron como trampas sedimentarias.

DINÁMICA NATURAL Y DINÁMICA MODIFICADA

El comportamiento dinámico del río Jarama durante las inundaciones era claramente distinto cuando se producía en un momento en que el río apenas estaba modificado, al momento actual, cuando el río está modificado de forma artificial. Así, se pueden diferenciar dos clases de comportamiento y sus consiguientes efectos sedimentarios, que podemos denominar:

1. En condiciones naturales. Observable solo en fotos aéreas y en los sedimentos antiguos del río.

2. En condiciones claramente modificadas. Observable en medidas directas y cuantificables, así como mediante las fotos aéreas recientes. Hay que considerar, de todas formas, que aún cuando las condiciones generales del río están modificadas, algunas zonas presentan unas condiciones bastante parecidas a las naturales.

Tipo 1: Comportamiento en condiciones naturales.—La dinámica natural del río durante las avenidas se puede observar en las fotos aéreas de 1947, y sobre todo, en la de 1956, donde se aprecia claramente en la llanura de inundación del río una fuerte actividad sedimentaria correspondiente a una avenida reciente. Sigue la tendencia natural de cualquier río meandriforme con una llanura de inundación estrecha, como es el caso. Así, abandona su cauce y ocupa la banda de terreno adyacente, intentando mejorar las condiciones de evacuación mediante un ahorro energético. Las imágenes muestran claramente como los desbordamientos producen fundamentalmente la corta de meandros, la reutilización de antiguos surcos y la sedimentación de barras en los mismos (barras de chute). Las barras son mayoritariamente de arena, según se pudo ver en los cortes realizados en dichos sedimentos. Los crevasses sobre la llanura de inundación aportan material fino, arenas muy finas y limos principalmente, con ripples linguoides y pequeñas barras. La evolución natural del río (Garzón y Alonso, 1995) muestra que los meandros tienden a migrar aguas abajo y a rotar, sus cortas se producen siempre por «chute cut off», debido al tipo de río que es, con carga gruesa, y se producen sobre todo crevasses con reutilización de los antiguos surcos de meandro.

Tipo 2: Comportamiento en condiciones modificadas.—La dinámica reciente del río ha sido estudiada mediante el análisis de las fotos aéreas de 1988 y, sobre todo de la observación directa de la avenida de 1989. Las condiciones muy modificadas en que se encuentra el río han ocasionado cambios importantes en su forma y en sus respuestas dinámicas. Como ya se ha descrito, los principales cambios que ha habido en el río han sido: Encajamiento, rectificación y cortas de meandros. Durante los momentos de avenida, estos cambios morfodinámicos han dado como resultado importantes efectos sedimentarios y erosivos, que principalmente son:

EFFECTOS EROSIVOS:

Encajamientos. Todo el tramo situado entre Talamanca del Jarama y el Puente de San Fernando, en la carretera Nacional II, presenta un claro encajamiento, pero la magnitud del mismo no es homogénea. Existen tramos don-

de todavía el río discurre sobre barras de gravas mas antiguas en un claro proceso de lavado y destrucción de las mismas, mientras que en otros el encajamiento ha llegado al substrato rocoso, produciendo erosión del mismo, rápidos, surcos etc. Se puede dar una media de 2,5 a 3 metros, con un máximo en el tramo situado justo aguas arriba de la confluencia con el río Guadalupe, en el meandro del Esparragueral y en la colonia Silillos, donde corta hasta 4 metros de zócalo.

Erosiones en la llanura de inundación. En la llanura de inundación se produjeron varias zonas de erosión difusa, dando lugar a superficies de cantos lavadas. En otras ocasiones se produjeron surcos de excavación, canales someros o surcos erosivos alargados, coincidentes con líneas de flujo aceleradas (Fig. 4). Por último, también son abundantes los lugares donde se produjeron hoyos sobreexcavados de dimensiones muy variables. En casi todos los casos se podía observar como las erosiones se habían producido por la aceleración anómala del flujo debido a la existencia de obstáculos que impedian la expansión de la lámina de agua, o, en el caso de los hoyos, a la existencia de excavaciones previas, ampliadas y profundizadas.

Erosiones en las orillas. Fundamentalmente por deslizamientos rotacionales originados principalmente en las orillas cóncavas de los meandros, debido a la fuerte aceleración de la corriente en estos lugares (Fig. 4).

EFFECTOS SEDIMENTARIOS:

Barras de chute. Durante el proceso de desbordamiento, el río reutiliza los antiguos surcos de las barras de punta. Las barras formadas en dichos surcos, (barras de chute) llegan a tener unas dimensiones relativamente importantes, de hasta 10 metros y alturas de hasta 1 metro. Se trata generalmente de megaripples de cresta ondulada, que dan lugar a barras de arena con estratificación cruzada de surco. En dos casos el tamaño de grano fué mayor, de conglomerados finos y microconglomerados. En pocas ocasiones se llegan a producir delta chutes, ya que la disponibilidad de material no es muy grande. Un ejemplo lo constituye el meandro de Viveros, representado en la figura 4.

Malecones. Los desbordamientos sobre las orillas cóncavas de algunos meandros dieron lugar a la sedimentación de cuñas de arena de tamaño grueso a medio, con laminación de bajo ángulo inclinada hacia la llanura y que pasa lateralmente a arenas de tamaño de grano fino y limos, con ripples linguoides. Las dimensiones de estos malecones naturales son reducidas, con potencias máximas de hasta 25 centímetros y anchura de la cuña arenosa de unos 20 metros máximo.

Lagos de oxbow. En dos meandros se produjo el encharcamiento durante bastante tiempo de antiguos surcos de meandro abandonados y que conser-

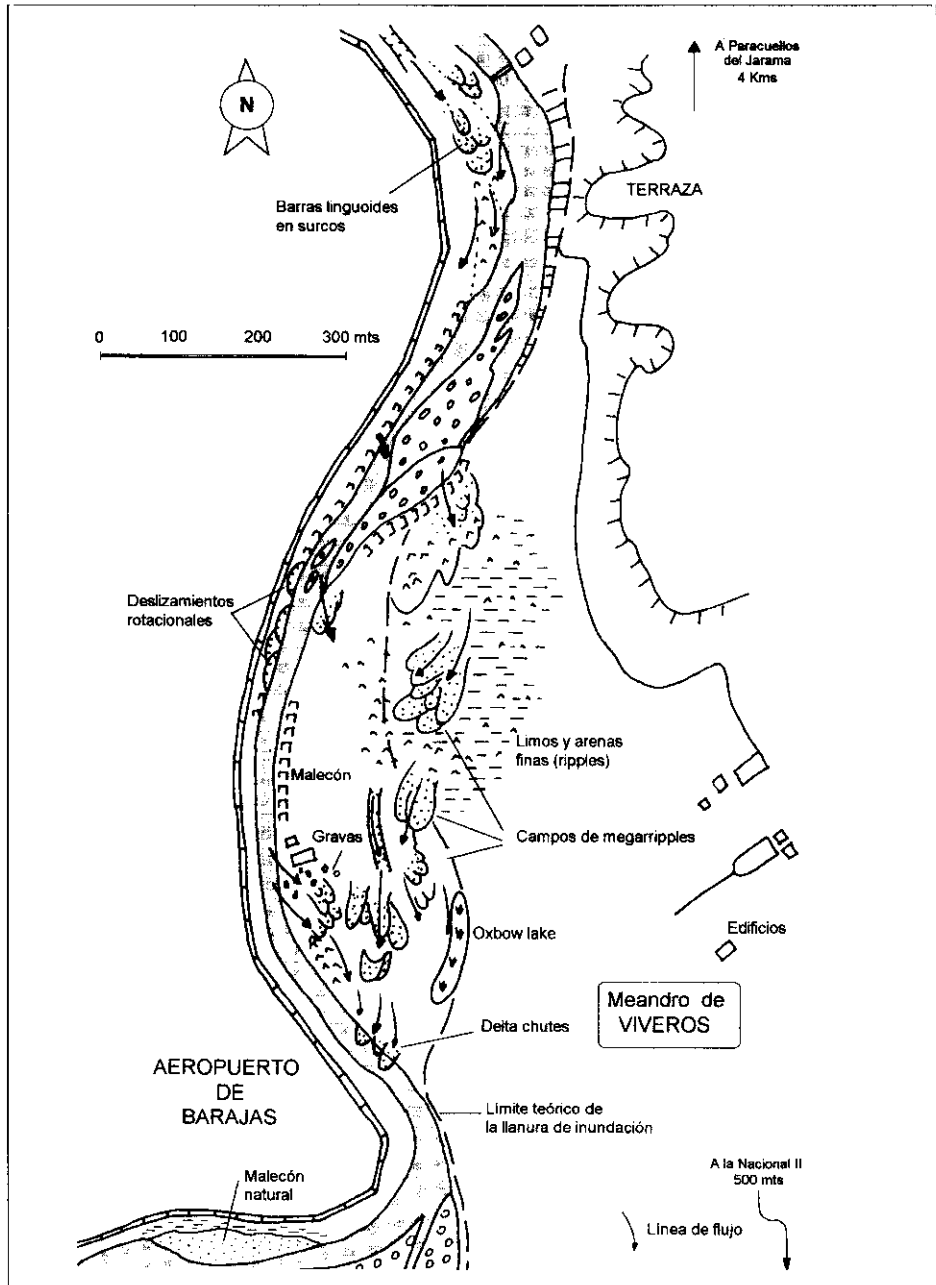


Fig. 4.—Meandro de Las Castellanas. Principales efectos sedimentarios.
 Fig. 4.—Main sedimentary effects in Las Castellanas meander.

vaban su forma deprimida. Se trata de los «oxbow lakes» que se preservan aún en el meandro de Viveros (Fig. 4) y el mas extenso del meandro de Paracuellos del Jarama. En ambos casos están invadidos por carrizales y durante la avenida se llenaron de agua que meses después aún conservaban parcialmente. La sedimentación predominante es de fangos, por decantación.

Desbordamientos

En la llanura de inundación. Los desbordamientos se produjeron generalmente por la rotura de malecones artificiales construidos en la zona aguas abajo de las orillas cóncavas del meandro, irrumpiendo en la antigua barra de meandro y ocupando la estrecha franja de llanura de inundación que bordea al río. Esto provocó erosiones y acumulaciones sedimentarias que se manifestaron sobre todo en superficies extensas de ripples linguoides, y en algunas barras arenosas con megaripples lunados. En ocasiones, la energía de la corriente fue capaz de transportar gravas hasta la llanura de inundación del río, donde se formaron barras de poco espesor pero bien delimitadas, con imbricación de los cantos. En el Meandro de Viveros (Fig. 4), el río rompió un malecón artificial bajo, y se desbordó dando lugar a extensos campos de acumulación de finos, limos con ripples y arcillas en las zonas mas próximas a la rotura. Sin embargo, siguiendo las líneas de flujo de la corriente en su camino de retorno al cauce, se produjeron en la llanura excavaciones difusas y en surcos que dieron lugar a la formación de campos de megaripples lunados de arenas con extensiones de hasta 50 metros y con alturas medias de 30 cms.

En las graveras excavadas en la llanura. Los efectos sedimentarios durante la inundación fueron importantes en las zonas excavadas próximas al cauce, es decir en las múltiples graveras que jalonan las márgenes del río, separadas de él muchas veces por malecones de echadizo. Estas depresiones actuaron como grandes trampas sedimentarias, se rompieron los malecones en su caso y la mayor parte de la carga de fondo del río movilizada por la avenida se introdujo en ellas.

En estas depresiones se formaron barras de gravas con forma de lóbulo de spillover de grandes dimensiones, entre 50 y 110 metros de longitud y 1 metro de altura, y con imbricaciones; campos de barras de arenas, con dimensiones de hasta 100 metros de anchura por 150 de longitud. Los megaripples que forman las barras son linguoides, con alturas comprendidas entre 0,4 y 1 metro.

En la figura 5 se expone un ejemplo (Arroyo de la Vega), donde existe una gravera de forma alargada, y donde los efectos sedimentarios fueron importantes. En este caso no existe malecón artificial sobreelevado sobre la

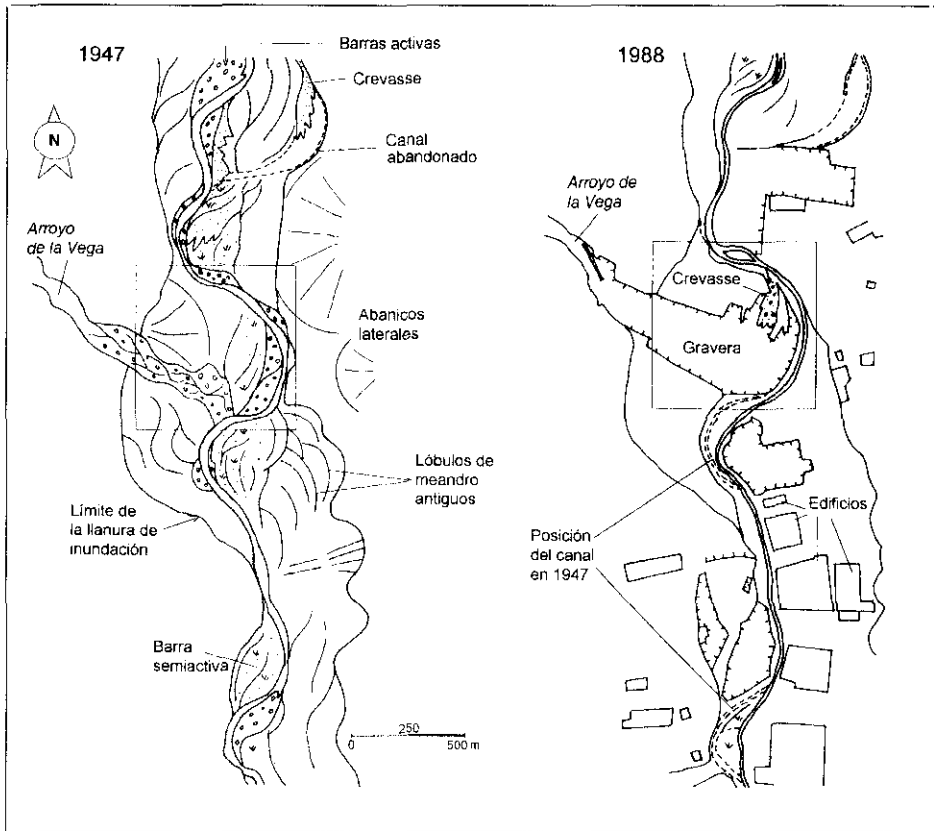


Fig. 5.—El tramo de la desembocadura del Arroyo de la Vega al sur de Alcobendas. Aspecto en 1947 y en 1988, con la situación de la gravera excavada.

Fig. 5.—Arroyo de la Vega mouth (South of Alcobendas). The river in 1947. Same reach of the river in 1988.

llanura, y el río introdujo parte de su carga de fondo que quedó atrapada en la excavación. Probablemente, además, gran parte del material movilizadopor el río en la avenida proviene del retrabajamiento de barras introducidas en crecidas anteriores y en la exhumación de barras antiguas no explotadas durante la extracción. Se formaron barras ocupando un campo de 180 metros por toda la anchura de la excavación. La línea principal de flujo produjo un surco de erosión en la parte oriental de la gravera, cuya expansión dio lugar a la formación de una barra de gravas de 110 metros (Fig. 6).

Modificaciones de las barras. No ha sido posible cuantificar las dimensiones de movilización de las barras de gravas que constituyen la carga de fon-

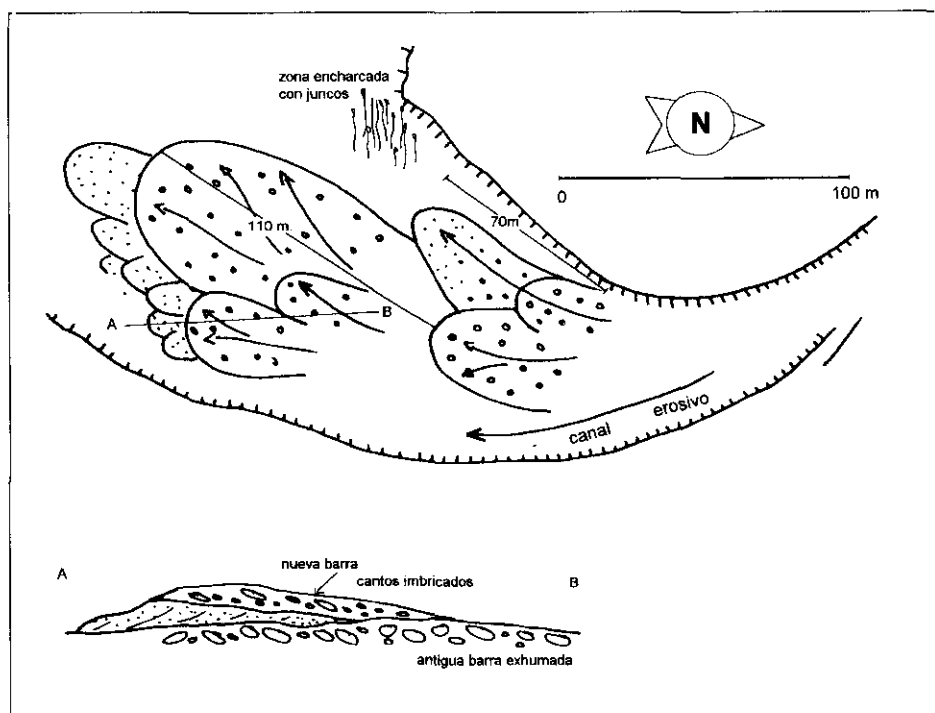


Fig. 6.—Detalle de las barras movilizadas en la gravera de los recuadros de la figura 5.
 Fig. 6.—Detail of the enlarged bars in figure 5.

do del río, pero sí se constata que las modificaciones principales fueron la erosión parcial de las mismas y su lavado, con desaparición de los clastos de menor tamaño, y concentración paulatina de los mayores, y la importante reordenación de dichos cantos mediante la imbricación casi completa de los mismos. Además, en algunas de las barras centrales y laterales del río, así como en las de puntas se han podido ver ocasionalmente indicios claros de sedimentación y recrecimiento. Fundamentalmente se puede apreciar en relación a la vegetación que las cubría, que fué sepultada por gravas o arenas. En la confluencia con el río Guadalix se formaron grandes barras en el cauce del Jarama, barras centrales y laterales de gravas.

Otros efectos. Durante la crecida el río tendió a recuperar al máximo sus condiciones naturales, reconstruyendo su morfodinámica primitiva. En la figura 7 se ha representado un ejemplo de este tipo; representa un tramo del río en la zona de Silillos, en el que se reconstruyó una barra que había sido activa hasta el año 1956. El esquema muestra cuatro etapas en la evolución

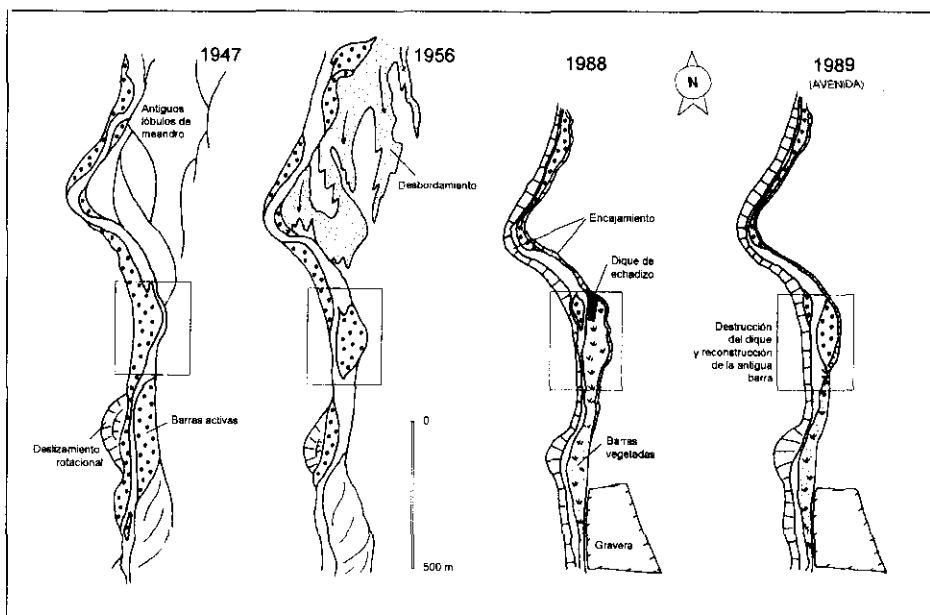


Fig. 7.—Tramo de Silillos. Evolución del río desde 1947 hasta 1989. Reconstrucción de las condiciones naturales por la avenida.

Fig. 7.—Silillos reach. Four stages in the evolution of river (since 1947 to 1989). The natural conditions were recovered after flooding in 1989, and artificial wall destroyed.

de este tramo del río, el adosamiento de la barra a la orilla oriental, separada por un canal secundario que ocupa el lugar del antiguo cauce activo. En el 88, la construcción de un dique de echadizo (en negro en la figura) había originado la desaparición de la barra y la formación aguas abajo de una amplia zona semiencharcada, con vegetación de juncos y algunas plantas mayores.

Durante la avenida de 1989, el dique fue completamente arrasado y una nueva barra fue reconstruida exactamente en la misma posición en que había estado anteriormente. La barra tiene unas dimensiones de 230 por 65 metros, y funcionó como una barra diagonal, la corriente principal ocupó el antiguo canal secundario y cruzó la barra en sentido diagonal hacia el canal principal, produciendo acreción en la cara de avalancha situada en dicho canal. El canal secundario vuelve a ser activo en situaciones de aguas altas. Los megarripples que se formaron en la cola de la barra tienen forma linguoide, con dimensiones máximas de hasta 12 metros de largo por 0,80 metros de altura. Esta barra funcionó también durante la crecida de 1991.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El río Jarama ha experimentado en las tres últimas décadas una fuerte transformación, pasando de su primitiva morfología de río meandriforme de sinuosidad media con carga de fondo gruesa, a río recto, encajado, con tendencia a desarrollar barras centrales y laterales. El motivo ha sido la alteración de sus variables hidrológicas independientes, Ql (caudal líquido) y Qs (caudal sólido). Las causas son antrópicas. La «metamorfosis» del río, utilizando una expresión de Schumm, continúa hoy día, y si cabe de forma acelerada.

La pérdida de Ql ha sido debida principalmente a la construcción de embalses en sus afluentes, lo que ha rebajado las crecidas medias, aunque no las punta. Las consecuencias han sido la revegetación del cauce por inactividad de las barras y la pérdida de su capacidad de desagüe. Por tanto, en el caso de crecidas importantes, la capacidad de evacuación del río es menor, y los efectos mas catastróficos.

La pérdida de Qs ha sido debida a la intensa actividad extractiva de sus gravas y arenas. Las consecuencias inmediatas afectan a las crecidas medias del río, con disminución de su evolución natural. Las consecuencias en el caso de crecidas punta son mucho mas importantes, ya que el río, con todo su poder destructivo, sin una carga sólida que disipe la energía, tiene una gran capacidad erosiva y por tanto tiende aún mas al encajamiento. La situación de desequilibrio que experimenta el río en las crecidas punta, con poca carga sólida, se incrementa por el hecho de que su tendencia a la rectificación hace aumentar la velocidad de la corriente, sin curvas donde se frene, y todo esto se manifiesta en una masiva destrucción de malecones y diques. La existencia de numerosas zonas deprimidas a lo largo del río, debidas a graveras abandonadas, constituye, paradójicamente, una medida de prevención de efectos aún mas catastróficos, ya que los principales efectos sedimentarios se producen en esas «trampas», que son el equivalente a backswamps de dimensiones gigantescas.

En cuanto a las respuestas sedimentarias de un río de estas características, se puede concluir que son de dos tipos:

1. Formas originadas en zonas donde el río está poco modificado, que son fundamentalmente las mismas que daría el río en condiciones naturales, y que se traducen sobre todo en cortas de meandros, reorganización de barras y sedimentación de finos en la llanura de inundación. La principal diferencia se refiere al hecho de que la carga sólida disponible es menor, por lo que el retrabajamiento de formas anteriores es manifiesto.

2. Formas originadas en zonas donde las modificaciones han sido muy importantes. En este caso, los efectos sedimentarios se encuentran amplificados, con rotura de malecones, surcos erosivos, desarrollo de crevasses con grandes formas sedimentarias arenosas en la llanura de inundación y, en el

caso de rellenos de zonas extractivas, grandes campos de megarripples, de gravas y de arenas, con formas de hasta 10 metros por 1 metro de altura.

La comparación entre las situaciones normales y las modificadas muestra que los efectos sedimentarios de un río se encuentran amplificadas en el caso en que este se encuentre muy modificado. El río tiende a intentar recuperar un comportamiento normal, meandriforme en este caso, aunque se encuentre constreñido en un canal más recto y cerrado por malecones. Los rompe y se expande el flujo. El retorno al cauce es, debido precisamente a la existencia de malecones, difícil, y los efectos catastróficos, se multiplican.

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, A. y GARZÓN, G. (1994): «Quaternary evolution of a medium sinuosity gravel bed river. Jarama River. Central Spain», *Terra Nova*, V. 6, núm 5, 465-475.
- ARCHE A. (1983): «Coarse-grained Meander Lobe Deposits in the Jarama river. Madrid (Spain)», ed: J. D. Collinson y U. Lewin (eds.), *Modern and Ancient Fluvial System*. Spec. Publ. Int. Ass. Sediment. N.6. 313-321.
- GARZÓN, G., ALONSO, A., LÓPEZ, J., y ARCHIE, A. (1990): «Desbordamientos en el río Jarama (Prov. de Madrid) e interferencia humana en la llanura de inundación», en *VIII Reunión de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio*, Gijón, Asturias. 259-271.
- MARTÍNEZ GOYTRE, J. y ALONSO, A. (1992): «Los cambios antrópicos en la dinámica del río Jarama (Madrid) como modificadores del riesgo de inundaciones», en *Cambio climático y Riesgos naturales*, vol. 3 de Simposios del III Congreso Geológico de España, Salamanca, pp. 628-638.
- y ALONSO, A. (1995): «Variabilidad holocena y reciente de un río de gravas. El río Jarama. Madrid», en T. Aleixandre, A. Pérez-González, (eds.), *Reconstrucción de paleoambientes y cambios climáticos durante el Cuaternario*, CSIC, Centro de Ciencias Medioambientales, Monografías 3, Madrid, pp. 79-92.
- MIALL, A. D. (1985): «Architectural-element analysis: A method of facies analysis applied to fluvial deposits», *Earth Sci. Rev.*, 22, 261-308.
- PÉREZ-GONZÁLEZ, A. (1980a): «Geología y estratigrafía de los yacimientos de áridos en la llanura aluvial de Arganda (Madrid)», en *Ocupaciones achelenses en el valle del Jarama*, Publ. Excma. Diput. Prov. de Madrid, 49-61.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, N. y SANTONJA M. (1980b): «Secuencia del Pleistoceno medio y superior en la región de Madrid y cronología de la terraza de áridos», en *Ocupaciones achelenses en el valle del Jarama*, Publ. Excma. Diput. Prov. de Madrid, 337-339.

Manuscrito recibido: 29 de junio 1995

Manuscrito aceptado: 6 marzo 1996