ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/277124445

El Río Guadarrama, morfología y sedimentación actual en un cauce arenoso tipo Braided.

Article · January 1996

CITATIONS
7

READS
75

2 authors, including:

Guillermina Garzón Heydt
Complutense University of Madrid

34 PUBLICATIONS **159** CITATIONS

SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by Guillermina Garzón Heydt on 17 February 2014.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

El río Guadarrama, morfología y sedimentación actual en un cauce arenoso tipo braided

G. GARZÓN* y A. ALONSO**

* Dpto. de Geodinámica, UCM, 28040, Madrid
** Fac. de Ciencias. Campus da Zapateira,
Univ. da Coruña, 15071, A Coruña

RESUMEN

El patrón de drenaje del río Guadarrama se ha estudiado en función de sus parámetros hidraúlicos y de las características geológicas de su cuenca. Su morfología esta condicionada por los cambios en la pendiente regional, pasando, aguas abajo, de un tramo rectilíneo con tendencia braided a uno braided sinuoso. De carga fundamentalmente arenosa, se caracteriza por una alta inestabilidad de las orillas, que son facilmente erosionables, y por la presencia en el cauce de barras complejas alternantes adosadas a las orillas y barras centrales, que dan lugar a arenas con estratificación cruzada de surco y planar. Lo mismo se observa en los cortes de los depósitos de la llanura de inundación, aunque en ella dominan los limos arenosos a techo.

No se han observado depósitos de acreción lateral en el sentido estricto de migración de barras de punta sino que se produce el crecimiento de las barras arenosas corriente abajo, y aunque en el tramo bajo del río aparecen segmentos curvos, estos no desarrollan barras en la orilla convexa y son cortados por canales de chute muy amplios que funcionan durante los momentos de aguas altas y en las avenidas. Este proceso esta favorecido por el flujo subálveo en la llanura de inundación, migrando entonces los tramos de tendencia braided a lo largo del cauce.

Se ha comparado este río con el Jarama, también afluente del Tajo y con su cabecera en el Sistema Central, pero que tiene carga de fondo de gravas y una sinuosidad media, con desarrollo de barras de meandro. La pendiente de ambos canales es bastante similar, incluso algo mayor la del Jarama, por tanto sus diferencias hay que achacarlas a la distinta carga. Así, el Jarama, de

Cuadernos de Geología Ibérica, núm. 21, pp. 369-393.
Servicio de Publicaciones. Universidad Complutense, Madrid, 1996.

carga mas gruesa, tiene tendencia a hacer meandros ya que a igual pendiente no es capaz de movilizar su carga tan fácilmente como el Guadarrama. De hecho, precisaría aún mayor pendiente para manifestarse como braided. Las características de ambos ríos, así como las de sus adyacentes en la cuenca estan claramente controladas por la geología del área madre.

Palabras clave: Braided arenoso, morfología, sedimentación, factores de control.

ABSTRACT

The drainage pattern of the Guadarrama river has been studied in relation to its hydraulic parameters and the geologic frame of its watershed. The river has an innitialy braided activity, but the change in regional slope induces a change into a sinuous braided pattern on its lower reach. Present day sedimentation consists in the shift of complex sandy bars with trough cross-bedding. The same situation is observed on the floodplain secuence, but dominated by loam deposits on top. Lateral accretion has not been observed, not even on the meanders of the lower reach. These ones are easily destroyed by chute-cutoffs, aided by the subsurficial flow on the sandy floodplain, and braided reaches shift thatway along the channel.

The Guadarrama channel has been compared with the nearby Jarama, a sinuous gravelbed river. As the regional slope is quite similar on both, their diferences should be explained by the change in bedload. The Jarama stream has a coarser load, and therefore would still need a higher slope to show up as a braided channel like the sandy Guadarrama does. The pattern of both rivers is therefore controlled by the geology of their parent materials, and the same happens with the surrounding rivers.

Keywords: Sandy braided, morphology, sedimentation, control factors

INTRODUCCIÓN

La red de drenaje de la cuenca del río Tajo ofrece una marcada disimetría entre los pequeños afluentes de su margen meridional y los largos y caudalosos cauces que confluyen desde el Norte procedentes del Sistema Central. Estos segundos tributarios, aunque inicialmente comparten condiciones semejantes, como su nacimiento en altas cotas de la cordillera y su desarrollo en dirección SW a lo largo del piedemonte terciario (Fig.1), presentan rasgos muy diferentes entre sí.

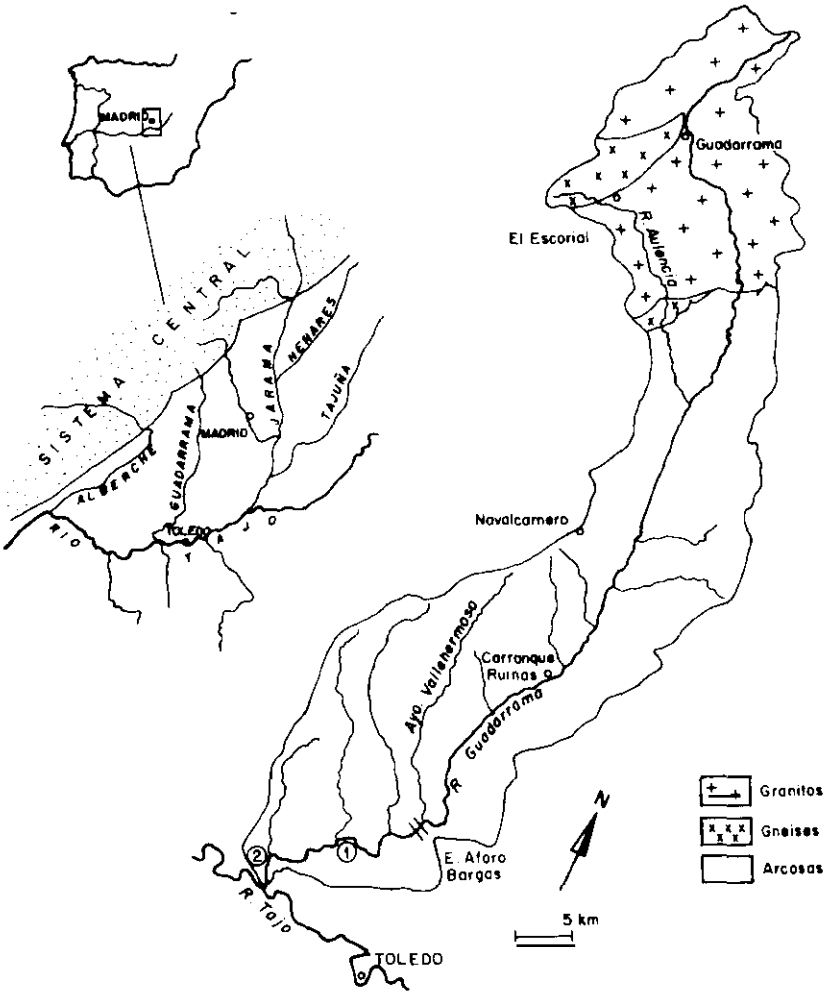

Fig. 1.—Situación de la cuenca de drenaje del río Guadarrama en la depresión del Tajo (Localización de los meandros estudiados 1. Alcalvin y 2. Vega del Tesoro)
Fig. 1.-Location of the Guadarrama river watershed within the Tagus river basin showing the studied meanders (1. Alcalvin and 2. Vega del Tesoro).

Si se contempla estos ríos en el marco más amplio de su cuenca, se puede ver que los cursos del Oeste de Madrid son ríos que proceden de áreas dominantemente graníticas y arcósicas (Manzanares, Guadarrama, Alberche y Tiétar), y presentan morfologías de tipo braided. Por el contrario, los cauces al Este de Madrid, cuyas áreas fuente son principalmente las rocas metamór-

ficas y las rañas de su cabecera (Jarama, Henares y Tajuña), tienen un carácter mas sinuoso.

No existen prácticamente trabajos previos sobre la caracterización actual de estos ríos y sus diferencias, exceptuando al Jarama, que ha sido relativamente bien estudiado debido en gran parte al interés que ha despertado el hecho de que se trate de un canal meandriforme de gravas. Carrillo y Arche (1982) y Arche (1983) describen los depósitos de sus terrazas estableciendo un modelo de río meandriforme que equipararon al de la dinámica del canal actual. Garzón et al. (1990 y 1992) analizaron el funcionamiento del río durante las avenidas, corroborando el modelo de canal de sinuosidad media con acreción lateral por barras de gravas bajo condiciones naturales. Alonso y Garzón (1994) enmarcan la evolución del río a lo largo de su encajamiento cuaternario sin encontrar grandes cambios respecto a su comportamiento, salvo diferencias en la carga y el caudal del canal.

Al Oeste del Jarama, los ríos Manzanares, Guadarrama, Alberche y Tiétar ofrecen por el contrario un comportamiento radicalmente diferente, tratándose de canales con arenas que presentan un patrón braided. El objetivo primordial del presente trabajo consiste en la caracterización morfológica y sedimentológica del Guadarrama, un río poco conocido hasta ahora, para intentar establecer, si es posible, cuales son los factores que controlan su morfología, establecer los que han determinado diferencias tan notables entre los sistemas del Jarama y del Guadarrama, si estas deben ser atribuidas a la litología del área fuente que controla el tipo de carga, o si existen otros condicionantes. Se ha escogido este río, y no el Manzanares, asimismo un río muy poco conocido y situado entre ambos, por varias razones, las principales de las cuales son que el Manzanares es un afluente del Jarama, que desde el punto de vista de sus dimensiones es poco comparable con el Jarama, y que al cruzar la ciudad de Madrid presenta un largo tramo de su recorrido canalizado, y por tanto sus condiciones naturales estan totalmente modificadas.

La metodología seguida en este estudio se ha centrado tanto en el canal actual como en los depósitos que conforman la llanura de inundación activa. Se analizan los parámetros morfológicos que definen el patrón del canal, y su condicionamiento por las variables hidrológicas de caudal y carga, dentro de su contexto geológico. Así mismo se ha definido la dinámica fluvial y la evolución del canal por comparación de fotografías aéreas de diferentes épocas. A partir de ello y de observaciones de campo, se ha establecido el funcionamiento del canal actual y se ha contrastado con el registro sedimentario de los depósitos de la llanura. Finalmente, el hecho de que recientemente el río haya sufrido avenidas de importancia, ha permitido describir su comportamiento durante las crecidas, compararlo con los resultados morfodinámicos anteriormente deducidos y apreciar la influencia de la actividad humana en el canal.

EL RÍO GUADARRAMA Y SU CUENCA

El río Guadarrama nace en el eje del Sistema Central, junto al puerto de Navacerrada, y sigue un trazado rectilíneo en dirección N-SSW hacia su desembocadura en el Tajo. Su nombre árabe es «Guad-a-rambla» o río de las arenas, que describe perfectamente el rasgo dominante de este curso de agua.

Apenas con un único afluente importante, el Aulencia, su cuenca presenta una morfología netamente elongada (Fig.1), que indica el claro dominio en la captación y jerarquización del drenaje por parte de los dos grandes ríos adyacentes, el Jarama y el Alberche. Esto convierte al Guadarrama en un colector de mucha menor importancia que los anteriores pues su cuenca representa tan solo la novena parte de la del Jarama. El hecho de que el Guadarrama constituyera hasta el siglo XII una vía de penetración fundamental desde la Meseta Norte hacia Toledo, es posiblemente lo que ha determinado que diera nombre a un amplio sector de la Cordillera Central. La posterior pérdida de su significado como vía de comunicación explica quizás el que los núcleos urbanos estén en la actualidad apartados del río, en donde, sin embargo, se conservan asentamientos antiguos,entre los que destacan las ruinas romano-mozárabes de Carranque.

La alimentación del río Guadarrama es nivopluvial, con un caudal máximo diario es de 255m^3/seg. y un máximo instantáneo de 418m^3/seg. Su caudal medio es, sin embargo, apenas de 7.3 m^3/seg. lo que implica fuertes periodos de estiaje. Los datos están obtenidos en su tramo bajo, en la estación de aforo de Bargas para una cuenca de drenaje de 1353 Km^2. A partir de esta estación de aforo el río incorpora aún algunos de sus afluentes mas largos, llegando con ello a una superficie de cuenca total del orden de 1600 Km^2.

La cuenca adquiere con ello en este tramo final una mayor circularidad que puede ser significativa para el aumento de su caudal. No se tienen datos, sin embargo, de los aportes líquidos en esta zona, salvo del Arroyo de Vallehermoso, aunque en éste solo han sido medidos 0.19 m^3/seg. de caudal máximo instantáneo y 0.02 m^3/seg. caudal máximo medio, durante los pocos años de que se dispone registro.

Respecto a las características litológicas de la cuenca, esta presenta una gran homogeneidad, constituida apenas por dos grandes conjuntos. Su cabecera se desarrolla sobre granitos tardihercínicos que ocupan una cuarta parte del área de la cuenca, entre los que afloran algunos gneises glandulares hercínicos. Dichos materiales forman el frente montañoso y la Rampa Meridional de la Sierra de Guadarrama. El resto de la cuenca está constituida por las arenas arcósicas de la depresión terciaria del Tajo procedentes directamente de los abanicos aluviales originados en los citados materiales del Sistema Central. No existe una diferenciación neta que permita separar unidades litológicas distintas en estos sedimentos terciarios, pero se manifiesta un cambio lateral de facies con una clara disminución del tamaño de grano de

las arenas, y especialmente un aumento de las arcillas, hacia los tramos bajos del río.

El cauce discurre encajado en un suave valle flanqueado por retazos de múltiples niveles de terrazas, que en la salida del macizo granítico presentan alturas de hasta 90m. Composicionalmente en las terrazas mas altas dominan las gravas pero paulatinamente estas van haciéndose mas arenosas aguas abajo (ITGE, 1993). Hacia los tramos mas bajos el valle se ensancha y se hace mas suave quedando las terrazas muy desdibujadas. Cobran especial significado aquí los aportes de ladera y la removilización de material por los abanicos laterales, fundamentales para la alimentación del canal en momentos de riadas.

Estas características geológicas de la cuenca van a determinar la gran homogeneidad de los acarreos del canal compuestos prácticamente en su totalidad por arenas, salvo una pequeña fracción de limos que suele presentarse tapizando los depósitos y la llanura de inundación. El tamaño de grano de estas arenas disminuye también progresivamente aguas abajo. No se encuentran elementos groseros prácticamente ni en los cortes de la llanura ni en el cauce, aunque localmente pueden presentarse algunas barras microconglomeráticas o de gravas finas y algunos cantos dispersos en las arenas.

La llanura de inundación, que en su tramo bajo llega a tener una anchura de hasta 1 Km., presenta unos limites mal definidos, ya que existen muchos abanicos laterales de pequeño tamaño procedentes de las laderas. Por otra parte, las características del río, tanto morfológicas (importantes fluctuaciones de la descarga, variaciones en los parámetros braided), como sedimentológicas (carga fundamentalmente arenosa), no individualizan claramente el canal de lo que es una llanura de desbordamiento en sentido estricto, con predominio de depósitos de acreción vertical finos y cohesivos, por lo que sería mas correcto hablar de un lecho extraordinario o de crecida, en vez de utilizar el término llanura de inundación. El espesor de los depósitos actuales del canal es desconocido, aunque algunas referencias orales señalan una potencia de unos tres metros para el tramo bajo. En esta misma zona se ha observado localmente el encajamiento del lecho en el substrato, aunque esto es poco frecuente.

Lamentablemente no existe ningún dato sobre la carga sólida actual del río, pero teniendo en cuenta las características arenosas de los aportes y la alta inestabilidad de las orillas, puede considerarse que el volumen de material que se mueve en avenidas es considerable.

CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DEL CANAL

Respecto a la morfología del río se han calculado las variables semiindependientes, como la pendiente y la sinuosidad, que determinan su configuración y patrón. Estos parámetros se han analizado detalladamente a partir de la entrada del canal en los materiales terciarios, en donde puede considerar-

se ya un río aluvial libre de adaptarse a sus variables hidráulicas sin excesiva influencia de la litología del sustrato. Dentro de esta zona han podido diferenciarse claramente dos tramos: el medio y el bajo.

En el tramo medio, el río y su valle son prácticamente rectilíneos con unos valores de *sinuosidad* que varían entre 1.1 y 1.0, mostrando apenas una ligera tendencia a disminuir ésta aguas abajo. En el tramo bajo se produce un cambio notable de morfología, y tanto el río como el valle comienzan a formar amplias curvas. La sinuosidad del canal es de 1.31, pero también el valle aumenta su sinuosidad a 1.21.

La *pendiente* sigue unas pautas análogas a las de la sinuosidad, pero eventualmente presenta algunas anomalías de carácter local, posiblemente tectónico. Así, aunque a la salida del zócalo granítico la pendiente alcanza un 0.34% y va acompañada por la presencia de algunos meandros, en todo su tramo medio, el río mantiene una pendiente homogénea en torno al 0.16%. Se presenta solo un ajuste de pendiente (0.34%) hacia el centro de este tramo medio, sin ninguna razón evidente salvo su coincidencia con la desembocadura del río Aulencia. Los cambios en la pendiente del río se corresponden con cambios en la pendiente del valle.

En el tramo bajo, el río cambia su morfología totalmente rectilínea y tanto su canal como su valle pasan a tener una cierta sinuosidad. Inicialmente este cambio está también definido por un aumento en la pendiente (0.24%), que se manifiesta tanto en el canal como en el valle, pero la pendiente del río vuelve a disminuir luego considerablemente, alcanzando otra vez valores entre 0.11-0.20%. Cabe señalar en este tramo también la presencia de un cambio de pendiente, que llega a 0.36%. Esta zona coincide con el afloramiento del substrato en el lecho del cauce y se sitúa además inmediatamente aguas abajo del meandro de Alcalvin, en el que como veremos se ha producido una corta recientemente, incrementando con ello aún más ésta pendiente en la actualidad. El aumento de pendiente en el tramo bajo del río con respecto al medio, que coincide además con un cambio brusco en la dirección, podría atribuirse al incremento del gradiente regional, que en esta zona aumenta hasta un 0.38% del 0.16% previo.

Los cambios morfológicos de un río a lo largo de su cauce son, en muchas ocasiones, difíciles de explicar, debido a que en un sistema complejo como es el fluvial, se produce una sinergia de muchos factores con interferencias múltiples. Siguiendo a Schumm (1981), los principales factores a considerar son el Caudal líquido Ql, el Caudal sólido Qs, la Pendiente s, la Anchura y la Profundidad del canal W y D, la Sinuosidad P y la naturaleza de los materiales sobre los que discurre el curso de agua, sin olvidar otros factores menores o locales, como la importancia de los aportes subterráneos al cauce. Así, el citado autor elabora un gráfico ya clásico, en el que se especifica como, a igual carga, un cauce pasará de rectitíneo a meandriforme y finalmente a braided en respuesta a un aumento de pendiente.

El aumento de sinuosidad del cauce del río Guadarrama hacia tramos mas bajos del río podría explicarse así como respuesta y autoajuste del canal a unas condiciones de mayor pendiente, pasando de un tramo mas recto a uno mas sinuoso, tal y como ha sido descrito en casos de actividad tectónica (Ouchi,1985). Aunque ésta se presenta como una de las causas mas evidentes, no se puede excluir el hecho de que en esta zona el río incorpora tres de sus afluentes mas largos, lo cual podría suponer un incremento de caudal líquido con respecto a su carga sólida, influyendo también así en el aumento de sinuosidad del cauce. Además, teniendo en cuenta las características generales de la cuenca, el aumento de caudal podría estar justificado posiblemente por los aportes de agua subterránea. Finalmente, otro aspecto a considerar es el factor litológico, pues en este tramo bajo el substrato arcósico terciario se hace sensiblemente mas arcilloso, lo que haría las orillas mas cohesivas, pudiendo así condicionar la incisión actual del canal.

La anchura del cauce es muy variable, aunque en general la relación anchura profundidad es alta. Con respecto al patrón del canal, puede decirse que en su tramo medio presenta un trazado rectilíneo con unos parámetros de braiding bajos, con barras laterales arenosas alternantes. En las zonas en que se produce el ensanchamiento del canal, la morfología pasa a ser braided somero con barras centrales y laterales. Por el contrario en el tramo bajo, puede hablarse de un cauce de tipo «braided sinuoso», según la clasificación de Brice (1983). Como tal, el canal tiende a la formación de amplias curvas, aún dentro de conservar sus características de braided y es manifiesta su capacidad de migración lateral y de cambio en la posición del thalweg. La anchura del cinturón de meandros coincide con la amplitud de la llanura de inundación.

Las características descritas permiten clasificar este río, con ciertas reservas, dentro de los que Miall (1996) denomina ríos braided arenosos someros y perennes, aunque presenta algunos rasgos morfológicos propios de los que llama ríos de baja sinuosidad con barras alternantes. Así, participa de las mismas condiciones de un río braided que solo tiene un canal activo en muchos tramos, con barras laterales alternantes formadas por campos de dunas que solo migran en los momentos de aguas altas, y cuya dirección de acreción es corriente abajo. Estas barras, cuando son cortadas por canales de chute evolucionan a barras centrales. Por otro lado tiene tramos en los cuales aumenta el parámetro de braiding, zonas donde se produce el ensanchamiento del cauce, y donde aparecen mas barras. El ejemplo mejor descrito de este tipo de ríos es el Platte (Smith,1971; Miall, 1977; Blodget & Stanley, 1980; Crowley, 1983), aunque las dimensiones son mayores, y las fluctuaciones de la descarga menores.

Otros ejemplos comparables en cuanto a su morfología y comportamiento, y que se acercan mas a sus dimensiones, son los de los ríos Tay en Escocia (Gilvear, 1993), el William en Canadá (Smith y Smith, 1984), o el Calamus (Bridge et al., 1986), aunque el primero tiene una carga mas gruesa.

CARACTERÍSTICAS SEDIMENTOLÓGICAS

Desde el punto de vista sedimentológico, las formas y estructuras que se observan en el cauce del río y en la llanura de inundación son muy similares a lo largo de los tramos medio y bajo, sin que se puedan ver variaciones relevantes, excepto por el aumento del número de barras en los tramos ensanchados, en los que es posible encontrar barras centrales además de las adosadas lateralmente. Esta homogeneidad se extiende también a las características de los sedimentos que pueden estudiarse en los escasos afloramientos de formas mas antiguas.

FORMAS EN EL CANAL Y LA LLANURA ACTUALES

La carga de fondo del río es arenosa, con tamaños de grano de medio a grueso. Solo ocasionalmente se presentan microconglomerados. Se organizan en barras complejas, centrales o adosadas lateralmente, con crestas planas, formadas por megarripples o dunas y ripples linguoides. En condiciones de aguas altas, todas las barras están sumergidas y se produce su migración por acreción o crecimiento de las mismas aguas abajo. Dan lugar a estratificación cruzada de surco, con algunas zonas de estratificación cruzada planar. Durante la caída del flujo se sedimenta material fino sobre las barras. En las etapas de estiaje, que son dominantes, la carga de fondo migra solo por un canal, o como mucho por dos. La carga de fondo se distribuye generalmente como barras adosadas a las orillas, que el canal va sorteando. Como se ha mencionado, estas barras no tienen un comportamiento de barras de meandro, no existen superficies de acreción lateral, su arquitectura interna corresponde a barras de canales braided.

En algunos tramos del río, especialmente en la zona mas próxima a su desembocadura en el Tajo, el cauce presenta algunas curvas abiertas, con un índice de sinuosidad de 1,30, sin desarrollo de barras de meandro. Durante las etapas de crecida tiende a disectar las curvas, rectificando su curso mediante la formación de anchos canales de chute, en los que se acumulan importantes barras arenosas. En estas cortas se forman verdaderos campos de megarripples de cresta recta, de hasta 50 cm de altura y varios metros de longitud de onda. En las figuras 2 y 3 se observan los grandes megarripples, de cresta recta en su mayor parte, que se formaron durante la crecida de Enero de 1996 en la corta del Meandro del Tesoro. La corta, cuya evolución se describe mas adelante, supone una incisión de rectificación de la curva del río de hasta 2 metros en la zona más próxima al canal activo, y la migración de un campo de dunas de arenas de tamaño de grano de grueso a medio. Entre ellas se depositaron limos y arenas muy finas, con ripples linguoides.

Además, los desbordamientos que rebosan los márgenes del cauce de cre-

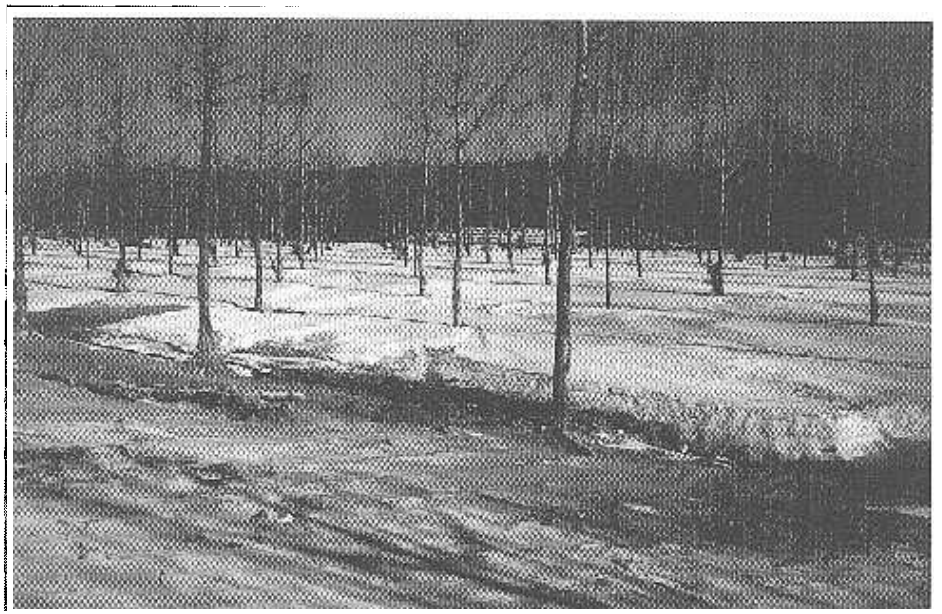

Fig. 2.—Formas sedimentarias originadas durante las crecidas de Enero de 1996 en el canal de chute del meandro de la Vega del Tesoro.
Fig. 2..—Sedimentary structures formed on the chute-channel of the Vega del Tesoro meander during the January 1996 floods.

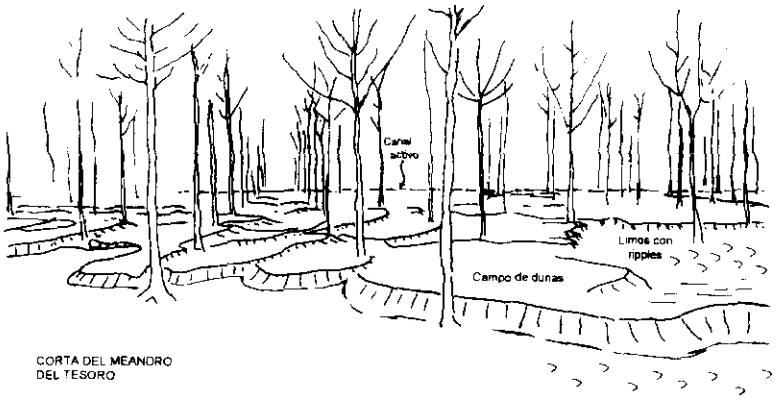

Fig. 3.—Esquema de la foto de la Fig.2 mostrando las formas de sedimentación en el canal de chute de la Vega del Tesoro.
Fig. 3.—Scheme of the picture in fig. 2 showing the sedimentary structures on the Vega del Tesoro chute cutoff.

cida dan lugar a cuñas de arenas en cuerpos con forma de abanico en planta y limos con ripples en las zonas mas distales. Están formadas por arenas con laminación paralela de alto régimen de flujo y ripples, que pasan a limos y arcillas en la llanura de inundación. Los márgenes del canal actual son bastante inestables.

Formas y estructuras antiguas

A lo largo del río existen muy pocas zonas donde se expongan cortes en los que sea posible observar las características de los sedimentos depositados por el río en etapas anteriores a la actual. Hay que tener en cuenta, además, que no existen por el momento datos acerca de la edad de la secuencia sedimentaria que constituyen los materiales que forman la actual llanura y cauce del río Guadarrama.

Los escasos cortes expuestos en las orillas del río muestran formas sedimentarias cuya interpretación difiere muy poco de la del río actual. Hay una diferencia en cuanto a que la anchura del cauce activo en aguas altas debió ser mayor en el pasado, cuando no estaba encajado. Así, los cortes muestran siempre (Fig.4) un paquete arenoso en la base con estratificaciones cruzadas de surco y raramente planares, correspondientes a las barras activas en un sistema braided, seguido hacia techo por niveles de limos arenosos y limos con ripples y con intercalaciones de niveles lenticulares de arenas. Estos niveles corresponden a la migración de megarripples de dimensiones variables en zonas poco activas del cauce y a cuñas arenosas producidas durante las etapas de desbordamientos.

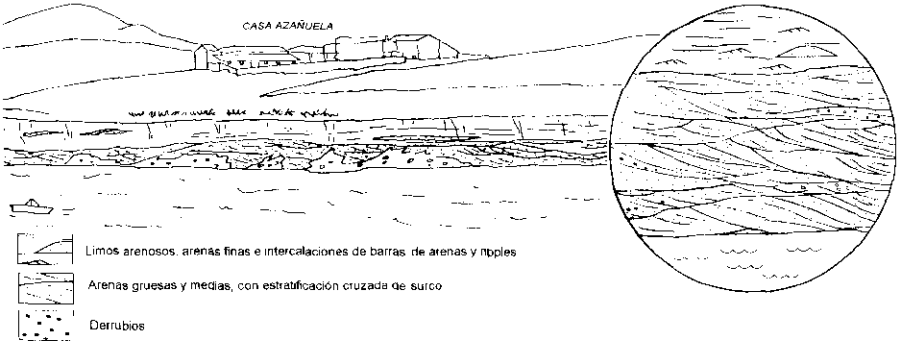

Fig. 4.—Exposición de los depósitos antiguos en un corte de la zona de casas de Azañuela y detalle ampliado (espesor aprox. 2m).
Fig. 4.—Exposure of bank deposits at Casas de Azañuela with amplified detail (aprox. thikness of 2m).

La secuencia mas completa observada tiene una potencia de algo menos de tres metros, siendo la proporción entre los limos y las arenas de la base muy variable. Por otra parte, el nivel de limos aumenta de potencia en detrimento del arenoso, en cuanto se aleja de la posición central del valle, es decir del amplio cauce activo. Las direcciones de paleocorrientes muestran una dispersión muy baja (ver fig.4), de forma constante a lo largo del río, incluso en los tramos en los que este es algo mas sinuoso. Esto está en consonancia también con las características actuales del río, que tiene un comportamiento netamente braided, con un trazado rectilíneo.

FUNCIONAMIENTO DEL RÍO EN AVENIDAS

Dos son los aspectos que condicionan la respuesta de un río como este durante las avenidas. Por un lado el hecho de que este modelo de río no tiene bien definido el limite morfológico y sedimentológico entre el canal de aguas altas y su llanura de desbordamiento, y por otra parte el que sus orillas arenosas sean altamente inestables permitiendo su fácil removilización.

En el invierno de 1996, tras un período de intensas lluvias en toda la Península Ibérica, se pudo observar el funcionamiento del río durante las crecidas. El río desbordó en diversos puntos de su cauce, anegando algunas partes de la llanura de inundación, sin que se produjeran daños importantes salvo el de la ocupación temporal de algunas tierras de labor, y muy localmente se formaron barras arenosas. Los efectos sí fueron considerables, por el contrario, en aquellos lugares en que se había producido extracción de gravas en el canal, como se detallará a continuación.

Erosión en las orillas

Una de las características definitorias de los sistemas braided es la gran inestabilidad de sus orillas y más sí su composición es arenosa, como en este caso. Sin embargo, bajo condiciones naturales, con recubrimiento vegetal de ribera y sin encajamiento del canal, los efectos erosivos no son significativos a escala humana, salvo en puntos muy localizados en que se esté rebasando el umbral morfológico de una forma. Esto es lo que se ha observado en el río Guadarrama, ya que los cambios en el canal entre las primeras fotos aéreas de 1945 y las actuales no han sido en general trascendentes, lo mismo se ha comprobado, en términos generales, durante las últimas inundaciones.

Sin embargo, el río esta sufriendo recientemente unas agresiones de alto impacto, que van a modificar considerablemente el comportamiento natural. Su origen esta en la reducción de caudal por la construcción de embalses y

extracciones de agua subterránea, la destrucción de la vegetación de ribera y, muy especialmente, la extracción de áridos en el cauce del río. La disminución de caudal por efecto de los embalses afecta fundamentalmente a las aportaciones liquidas pues estas obras se encuentran localizadas en cabecera.

El mecanismo operante en los sistemas braided es el de sedimentación en barras centrales y divergencia de flujo alrededor de ellas, lo que provoca que aguas abajo de las barras o islas el cauce se ensanche tendiendo a dar unas ondas de desbordamiento cóncavas en las orillas. Si éstas se encuentran protegidas por la vegetación se produce una inundación tranquila, sin apenas consecuencias. Sin embargo, cuando el cauce esta encajado, o las orillas no vegetadas, se pueden producir en éstas importantes socavaciones con *descalces de rotura cóncava* y *deslizamientos rotacionales*. Estas socavaciones son el efecto mas importante que se observa y se esta produciendo debido a la intensa extracción de arenas en el cauce, que se traduce en un encajamiento de varios metros en rápida expansión aguas arriba en el canal. Así, en la estación de aforo de Bargas, se ha producido la destrucción del encauzamiento y la pasarela de medida y se han afectado los cimientos de los puentes cercanos a la estación, debido a la existencia de una explotación aguas abajo y consiguiente acción remontante del encajamiento a que ha dado lugar. Estas extracciones se están efectuando en varios puntos del río, y no solo en el lecho, si no que también en las orillas, ensanchando estas considerablemente. Para paliarlo, se recubrn éstas de escombro suelto procedente de derribos.

Otro efecto significativo es el proceso de *sufusión* o erosión subsuperficial en las orillas favorecido por su composición arenosa y las intercalaciones de material arcilloso, así como por la eliminación de la protección vegetal de estas. Al bajar el nivel del cauce tras las avenidas, la rápida evacuación del agua que satura las márgenes, provoca el mecanismo de sifonamiento y lavado subsuperficial de arenas, con posterior colapso de los conductos así originados. El resultado es la formación en las riberas de cárcavas de varias decenas de metros de longitud.

Erosión en la llanura

Aunque evidentemente las formas dominantes en la llanura son de depósito, localmente pueden presentarse fenómenos de erosión. Cuando el desbordamiento es extenso, la evacuación del agua de la llanura se concentra en líneas de flujo preferente. Teniendo en cuenta las características altamente inestables de estas vegas, apenas recubiertas por una fina capa de limos y básicamente compuestas de arenas, es fácil que se produzca la incisión. Se han observado *hoyas de erosión* del orden de 2m. de diámetro y 1m. de profundidad, formadas a favor de alguna irregularidad del terreno o por modificacio-

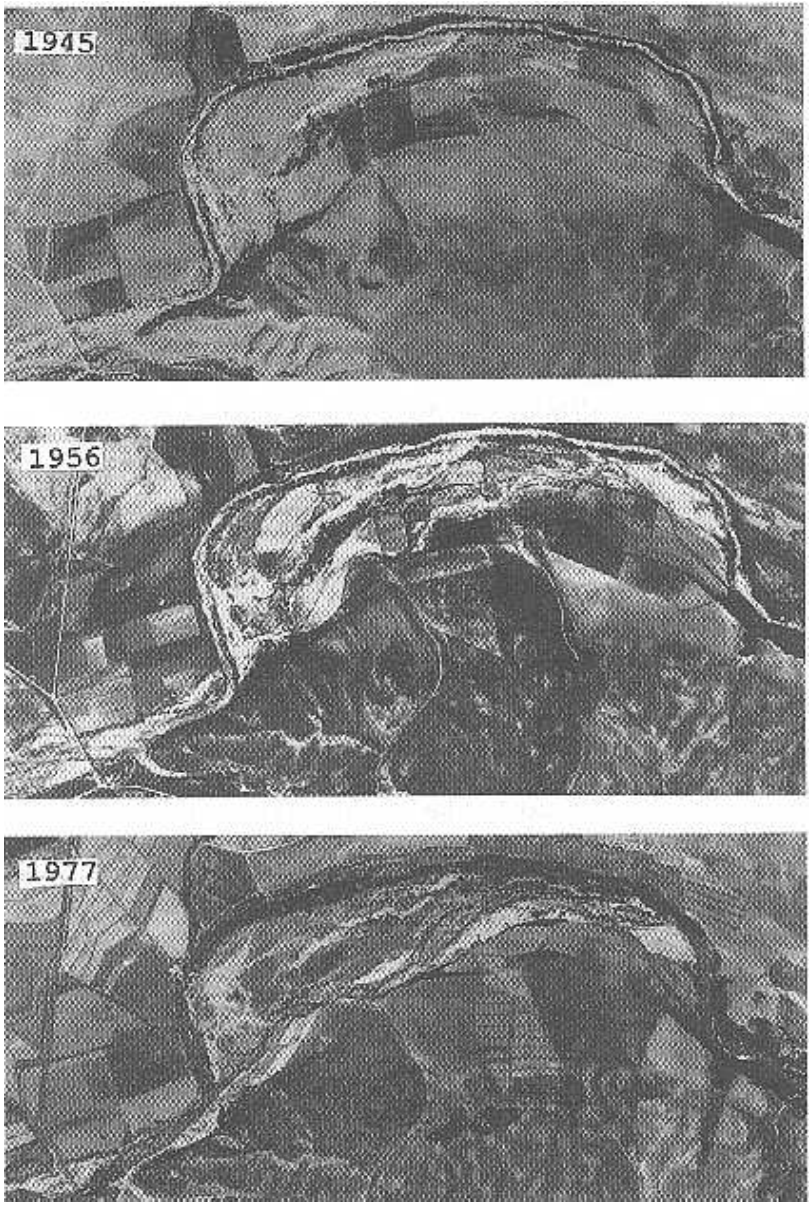

Fig. 5.—Evolución del canal de chute del meandro de Alcalvin en fotos aéreas de diferentes años.
Fig. 5.—Evolution of the Alcalvin meander chute-cutoff in aereal photographs of several years.

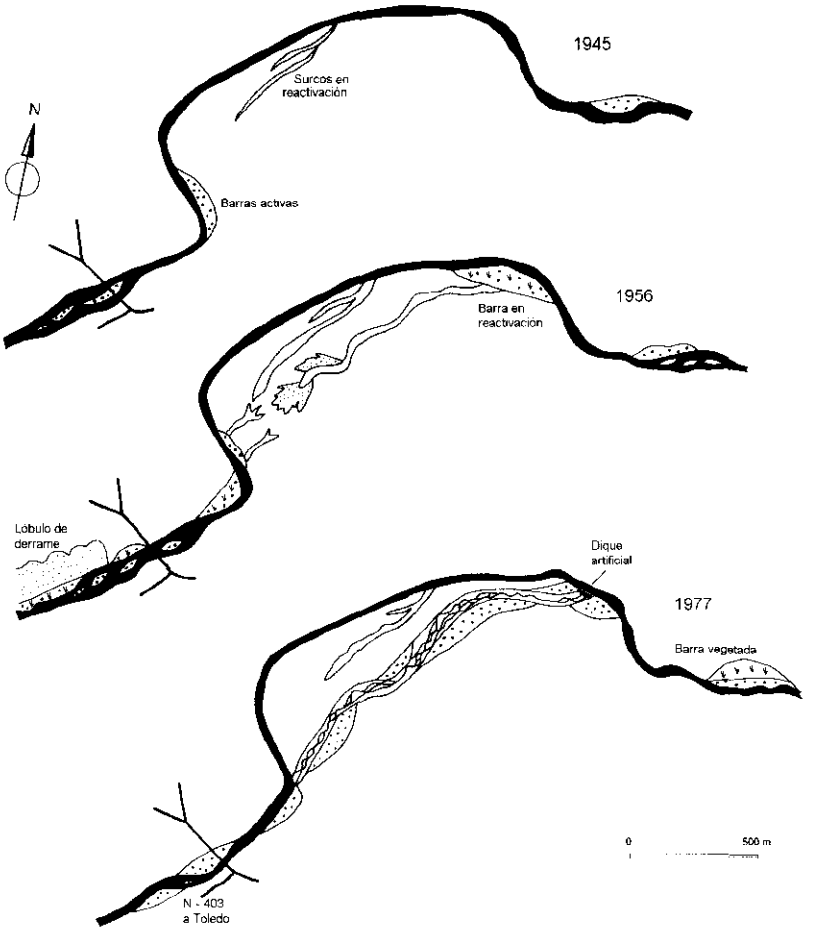

Fig.6.—Esquema de las fotos de la fig. 5 con el desarrollo sucesivo del canal de chute del meandro.
Fig.6.—Scheme of the aereal photographs from fig.5 showing the development of the chute-channel.

nes en el recubrimiento vegetal. A partir de estas formas pueden originarse auténticos *surcos o canales* que se mantienen entre avenidas y pueden reutilizarse de nuevo. Estas formas suelen aparecer a partir de la mitad inferior de la llanura desbordada y prolongarse aguas abajo desde allí, hasta la vuelta a su confluencia con el canal principal.

Entre los mecanismos de erosión en la llanura aparece como muy significativo el de *sufusión* favorecido por la composición arenosa del terreno. La

infiltración que se produce por la anegación de la llanura y la circulación subálvea en un medio tan poroso favorecen la surgencia de agua a favor de cualquier cambio de pendiente y el inicio con ello de la incisión.

CAMBIOS RECIENTES EN LA MORFOLOGÍA DEL RÍO

Para ver si la situación actual descrita para el río puede asimilarse a su dinámica evolutiva natural, se ha realizado un análisis comparativo entre las fotos aéreas existentes, que se remontan a 1945. En general, no se han observado cambios muy significativos en la posición del cauce, sino que las modificaciones se manifiestan en la distribución de islas y barras. Los hechos mas llamativos son la corta de dos meandros que se describe a continuación, el de Alcalvin y el de la Vega del Tesoro (Situación en fig.1).

Meandro de Alcalvin (Figs. 5 y 6)

La fotografía de Octubre de *1945* muestra un único lóbulo de meandro perfectamente funcional. Sobre la llanura, hacia el centro del meandro comienzan a insinuarse algunos surcos de corta. Aguas arriba y abajo del meandro el río presenta un aspecto braided.

La imagen de Mayo de *1956* refleja una etapa previa de intensa actividad de desbordamientos en la llanura. En el meandro, el surco incipiente de 1945 continúa y es mas activo, pero donde se ha producido una corta mayor es aguas arriba. De hecho la parte superior del meandro ha sido desbordada, produciéndose su lavado, y a partir de ahí se desarrolla un canal de corta hasta llegar al extremo inferior del meandro. En la parte baja, el agua de este nuevo canal parece dispersarse e infiltrarse para luego volver a surgir a partir de una posible cabecera de sufusión.

Aguas arriba de éste lóbulo parece observarse que el carácter braided ha aumentado, pero donde esta actividad es mucho mas manifiesta es aguas abajo de él. El tramo braided se ha extendido aquí remontantemente, y se produce erosión en las orillas y barras laterales. Sobre la llanura se desarrolla un gran lóbulo de derrame.

La fotografía de *1977* presenta un río ya claramente modificado por la actividad humana reciente. En general, puede hablarse de un encajamiento del cauce con revegetación de las orillas, posiblemente por la construcción de embalses, y el meandro de Alcalvin, aunque ha sido cortado ya totalmente por el río sigue manteniendo activo el canal antiguo por la presencia de represas, que aunque son destruidas periódicamente vuelven a levantarse. La corta se ha producido definitivamente según el canal insinuado en 1956, aunque la cabecera se ha desplazado aún mas aguas arriba. El canal cortado ha produ-

cido un amplio cauce braided, encajado en la llanura, aunque solo es parcialmente funcional pues desvían el agua artificialmente hacia el brazo abandonado. Dentro del canal se están formando grandes barras laterales.

Aguas arriba del meandro la zona activa de braiding ha seguido su evolución remontante.La barra funcional de 1945 esta revegetada y hay una nueva activa algo más aguas arriba. El lóbulo superior al meandro de Alcalvin, comienza a sufrir un crecimiento en forma de meandro, con intensa erosión en la orilla cóncava. Aguas abajo del meandro cortado continua la actividad braiding con varias barras centrales sumergidas, pero insinuándose ya su paso a barras laterales alternantes.

En las avenidas de *1996*, el río, como va muy encajado en la llanura, no ha desbordado en esta zona, pero ha tenido una gran actividad con mucha removilización de material y erosión en las márgenes. La cabecera de la corta ha seguido su acción remontante, comenzando ya aguas arriba en el propio escarpe del valle.

Meandro de la Vega del Tesoro (Fig.7 y 8)

El río se encuentra aquí en su tramo bajo, en donde es mas sinuoso. Sin embargo, no se han producido grandes cambios en esta zona desde 1945, en donde ya existía un brazo secundario del meandro. La imagen de 1956 refleja una gran actividad tanto en el canal como en la llanura, mientras que en la foto de 1977 el río esta mas constreñido en su cauce por la vegetación ribereña.

En la fig. 8 pueden observarse las modificaciones en el cauce durante estos años. En Octubre de 1945, existe ya un canal de corta secundario en el meandro, aunque no se encuentra encajado y se manifiesta por una sucesión de barras arrosariadas. En 1956 la corta ha aumentado de dimensiones, formándose un brazo nuevo algo mas aguas arriba. En 1977 la corta ha ensanchado mas aún, uniéndose los dos brazos anteriores. El canal está encajado y en los desbordamientos se producen lóbulos de derrame de arenas y arcillas.

Aguas arriba de este lóbulo de la Vega del Tesoro, el río se ensancha formando islas centrales. En las fotos de 1947 se observa que se está desestabilizando la parte alta del meandro y se está formando una nueva isla y en las de 1956 esta zona es mas activa aún, con erosión e inundación de islas. En la de 1977 de nuevo las islas se encuentran mas estabilizadas y se han revegetado, pero la zona activa se ha desplazado remontantemente.

La parte inferior del meandro de la Vega del Tesoro presenta de nuevo un tramo con tendencia braiding, aunque no tan marcada porque esta condicionada por una cierta sinuosidad. El período de gran actividad que precede a las imágenes de 1956 se refleja aquí en barras de desbordamiento y formación de algunos canales de corta incipientes. Sin embargo, la construcción de

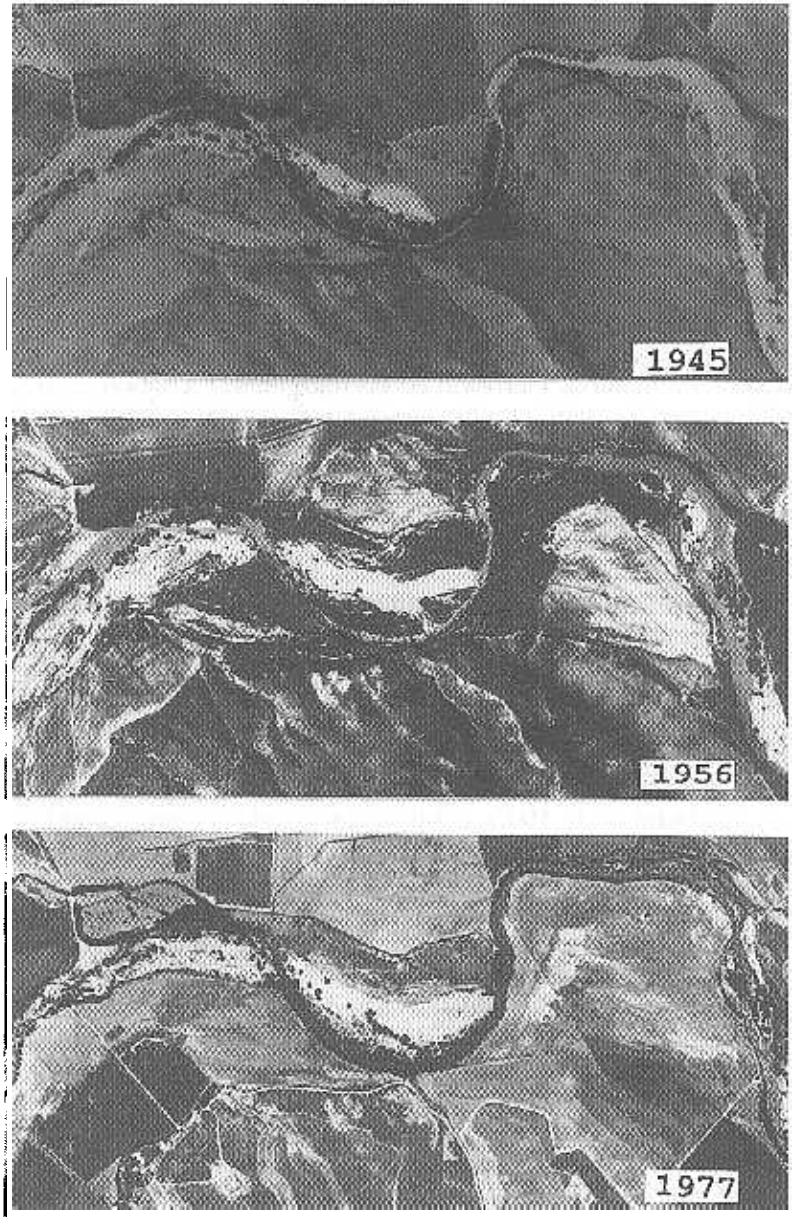

Fig. 7.—Evolución del canal de chute de la Vega del Tesoro en fotos aéreas de diferentes años
Fig. 7.—Evolution of the chute-channel of Vega del Tesoro on the aereal photographs of several years.

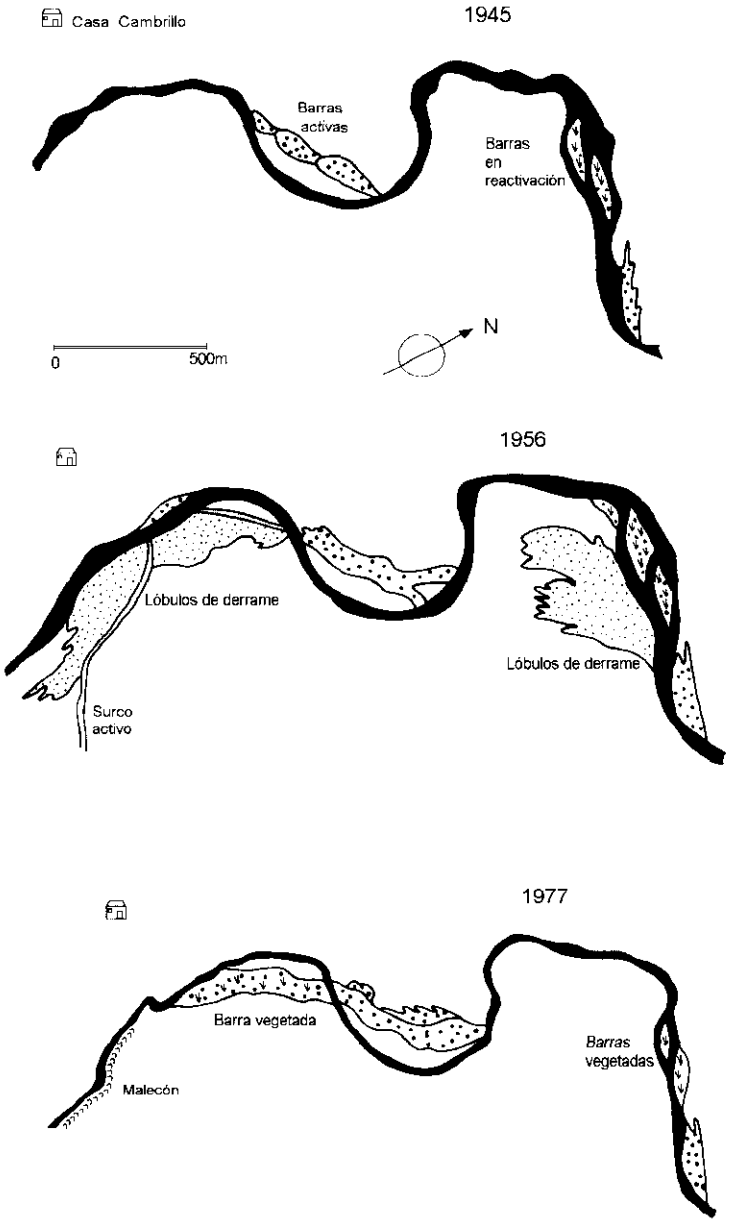

Fig. 8.—Esquema de las fotos de la fig.7 mostrando el canal de chute del meandro ya incipiente en 1945, y su evolución entre 1956 y 1977.
Fig. 8.—Scheme of the aereal photographs in fig. 7 showing the incipient stages of the meander cutoff in 1945, and its further evolution between 1956 and 1977.

malecones artificiales en la zona ha impedido la continuidad en esta evolución, y en la foto de 1977 solo sigue funcionando la barra de la parte alta de este tramo.

SÍNTESIS DEL FUNCIONAMIENTO Y DE LA EVOLUCIÓN RECIENTE DEL GUADARRAMA

La característica dominante del río es su tendencia braiding, aunque en su tramo bajo aparecen lóbulos de meandro que alternan con tramos rectos del río dominados por actividad braiding.Estos meandros no presentan, sin embargo, una evolución típica de crecimiento aguas abajo por acreción lateral de barras de punta. La evolución reciente observada es su tendencia a la corta, aunque posiblemente una vez ocurrida ésta, el meandro vuelva a formarse en una zona adyacente.

La corta del meandro se inicia por pequeños surcos hacia el centro de lóbulo que se van agrandando y sustituyéndose unos por otros en un relevo aguas arriba hasta alcanzar la parte superior del lóbulo. En el proceso de corta parece que tiene gran importancia el agua subálvea, que se infiltra en los surcos tras el desbordamiento y vuelve a aparecer en la parte baja del meandro posiblemente acompañada de procesos de sufusión. El canal de corta inicialmente está constituido por un cauce braiding muy ancho, que evoluciona para dar barras laterales alternantes.

Una vez producida la corta el tramo inferior a ésta desarrolla una gran actividad braiding y abundan los desbordamientos en forma de lóbulos de derrame. Aguas arriba, la otra zona de braiding tiene una intensa acción remontante, mientras que inmediatamente en la parte superior del meandro cortado comienza a apuntarse la formación de un nuevo meandro. Los tramos con actividad braiding presentan en general una tendencia remontante.

Desde el año 1945 al 1956 parece que el río ha entrado en una etapa de gran actividad, tanto de cortas como de desbordamientos, que se ve ya frenada por el encajamiento y constricción de las orillas en la foto del año 1977.

INTERPRETACIÓN COMPARATIVA DEL MODELO Y DINÁMICA DEL GUADARRAMA CON RESPECTO AL JARAMA

Las diferencias entre los ríos Guadarrama y Jarama son notables. A grandes rasgos el Guadarrama representa un modelo de río braided en arenas y el Jarama un río de sinuosidad mediana. La pendiente de ambos valles es alta,pero no ofrece sin embargo grandes diferencias y estas hay que justificarlas mas bien por el tipo de carga derivada de su condicionamiento geológico. La cuenca del Guadarrama aporta básicamente arenas, mientras que el Jara-

ma mantiene una carga residual de gravas, que se van reheredando sistemáticamente en su encajamiento y no puede eliminar.

Con una carga relativamente mas fina el Guadarrama es capaz de mantener una morfología braided, que se ve favorecida a su vez por la alta inestabilidad de sus orillas arenosas. El Jarama, por su parte, al tener una carga mas gruesa, no puede mantener la morfología braided con pendientes similares y entra ya en un modelo meandriforme. Esto concuerda con la propuesta de Schumm (1981) en que la relación sinuosidad/pendiente esta también controlada por el tipo de carga del canal. El modelo del Jarama corresponde al tipo de ríos sinuosos con barras de meandro en que estos tramos se alternan con otros tramos rectos de mayor estabilidad. Esto se ve potenciado además por la mayor dificultad de erosionar sus márgenes en las gravas que le dificultan la movilidad de su carga. Un modelo actual muy parecido es el del rio Babbage (en Miall, 1996) y el Upper South Platte (Crowley, 1983).

Otro parámetro a tener en cuenta sería el de caudal líquido, y en especial la relación caudal/carga sólida. Las características de braiding del Guadarrama estarían justificadas por una menor relación carga líquida/sólida que la del Jarama, pero no disponemos de datos de volumen de carga que permita confirmarlo. Si analizamos aún así solo los caudales líquidos (Tabla 1) vemos que el Jarama es un río 8 veces más caudaloso que el Guadarrama en condiciones medias, pero solo 5 veces en caudales punta. Dicho de otra forma, el Guadarrama aumenta 9 veces su caudal en avenida, mientras que el Jarama solo lo hace 6 veces respecto a su caudal medio. Esto quiere decir que el Guadarrama es un río mucho mas cambiante, con fuertes estiajes y grandes crecidas, lo que ocasiona una mayor indefinición de sus orillas y propicia el movimiento de material. Por el contrario el Jarama mantiene mejor su caudal a lo largo del año y las crecidas no son tan contrastadas, favoreciéndose más su estabilidad de márgenes.

Por tanto, el hecho de que la pendiente de ambos valles sea muy parecida, e incluso algo mayor la del Jarama no es suficiente para determinar el patrón del canal, y este hay que justificarlo básicamente en función de la proporción y tipo de carga solida.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Las características del río Guadarrama están en concordancia con su condicionante geológico de área madre en granitos y arcosas que determinan su composición arenosa. Dada su pendiente regional y la alta inestabilidad de sus orillas el canal adquiere un patrón braided. Estos rasgos se observan tanto en la morfología y sedimentación actuales, como en los depósitos que forman su llanura de inundación.

El funcionamiento sedimentario consiste en la formación de barras com-

	Área de Cuenca (Hasta Est. Aforo más baja)	Caudal m³/seg.		Geología Cuenca	Carga dominante	Tramos medio-bajo		Patrón (Brice)
		Medio	Máximo			Pendiente del valle	Sinuosidad del río	
Guadarrama	1.353 km² (Bargas)	7.3	68	25% Granitos 75% Arcosas	Arenas	0.16%	1.0 1.31	Braided sinuoso
Jarama	11.549 Km² (Puente Largo)	58	378	10% Granitos 25% Metamórf. 15% Calizas 5% Gravas 45% Arcosas, Arcillas, Evaporitas	Gravas	0.2%	1.4	Sinuoso con barras de meandro

Tabla 1.—Síntesis comparativa de los principales parámetros de los ríos Guadarrama y Jarama.
Table 1.—Overview of the main parameters of the Jarama and Guadarrama rivers.

plejas adosadas a las orillas, que migran aguas abajo durante los momentos de aguas altas y por migración en los canales de megarriples fundamentalmente de cresta discontinua, que dan lugar a estratificación cruzada de surco. Este mismo hecho se refleja en los sedimentos de la llanura constituidos por un paquete arenoso con estratificación cruzada de surco al que se superpone un nivel de limos arenosos con ripples y niveles lenticulares de arenas intercalados.

En el tramo bajo del río Guadarrama, el gradiente regional se hace mayor, pero frente a este hecho, tanto el valle como el río aumentan su sinuosidad. Aunque esto aparentemente pueda parecer una contradicción, es posiblemente una respuesta de autoajuste del canal para compensar la mayor pendiente, aunque también pudiera estar favorecido por el incremento relativo de caudal y carga fina. El río pasa así a convertirse en un canal braided sinuoso, en el que pese a aparecer curvas de meandro, estas alternan con tramos braided y el modelo de sedimentación es típicamente braided, sin evolución de barras punta ni acreción lateral.

Esta dinámica queda también de manifiesto en los momentos de crecida y en la evolución del río en los últimos años. La corta de meandros se produce por canales de chute, aunque el grado de apuntamiento de estos sea aún pequeño. Para ello tiene gran importancia la circulación de agua subterránea favorecida por la composición arenosa de la llanura, y se pueden producir además procesos de sufusión. Estos canales de corta se van relevando progresivamente aguas arriba y actúan como canal de avenida simultáneamente con el canal antiguo, hasta que pasan a ser el principal. Inicialmente tienen un carácter braiding muy activo, puesto que su alta pendiente se lo favorece, y en ellos se forman extensas barras y vastos campos de megarriples. En la llanura se desarrollan lóbulos de derrame de arenas y limos y llanuras arenosas complejas. Cuando las orillas no están suficientemente protegidas por la erosión se producen descalces con rotura cóncava y procesos de sufusión.

Frente a estas características del Guadarrama, el río Jarama presenta un comportamiento totalmente distinto. Ambos ríos parten aparentemente de unas condiciones similares (igual cabecera en el Sistema Central, la mayor parte de su recorrido transcurre por la cuenca terciaria del Tajo, etc) sin embargo, sus características son diferentes, y aparentemente en los dos casos, anómalas. El Jarama es un río de carga de fondo muy gruesa, de gravas, y su comportamiento es el de un río meandriforme, pues si bien su sinuosidad es solo media (entre 1,5 y 1,3) forma barras de punta bien desarrolladas, con las típicas estratificaciones épsilon. La llanura de inundación, bien diferenciada, muestra aun claras señales de las curvas trazadas por tal morfología. El río Guadarrama, por el contrario, es un río de carga de fondo arenosa, que circula por un valle de trazado bastante recto, y con un comportamiento de cauce de tipo braided arenoso.

Las principales características de estos ríos se resumen en la Tabla 1. Puesto que la pendiente de ambos canales es bastante similar, incluso algo mayor en la del Jarama, sus diferencias hay que achacarlas a la distinta carga. El Jarama, de carga mas gruesa precisaría aún mayor pendiente para manifestarse como braided, mientras que el Guadarrama lo hace fácilmente por ser su carga de arenas y sus orillas muy inestables. El hecho de que el Guadarrama tenga además unos caudales líquidos mucho mas variables, aumentando su caudal máximo hasta 9 veces su caudal medio, favorece también un canal braided.

Finalmente cabe señalar que el patrón y sedimentología de estos cauces se mantienen con bastante uniformidad desde su entrada en los materiales de la cuenca terciaría. Por lo que se deduce además de la observación de sus terrazas, parece que las características de estos ríos se han mantenido de forma bastante similar durante su encajamiento cuaternario, a pesar de las posibles fluctuaciones de caudal sufridas. Todo ello lleva a apoyar también que para tan diferentes dinámicas y formas sedimentarias el factor responsable es el condicionamiento geológico del tipo de carga.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento a los Dres. M. Díaz, A. Arche y J.L. Pagés, cuyos comentarios y sugerencias nos han permitido corregir defectos y mejorar el trabajo original. El trabajo se ha realizado dentro del Proyecto *PB94-0276-C02-01*, subvencionado por la DGICYT.

BIBLIOGRAFÍA

ALONSO, A. y GARZÓN, G. (1994), «Quaternary evolution of a meandering gravel bed river in Central Spain», *TerraNova*, 6, 456-475, Oxford.

ARCHE, A. (1983), «Coarse-grained Meander Lobe Deposits in the Jarama river, Madrid (Spain)», en *Modern and ancient Fluvial Systems* (ed. J. D. Collinson and U. Lewin), Spec. Publs. Int. Ass. Sediment., 313-321, Oxford.

BLODGET, R. H., STANLEY, K. O. (1980), «Stratification, bedforms and discharge relations of the Platte braided river system. Nebraska», *J. Sed. Petrol.*, 50, 139-148.

BRICE, J. (1983), «Planform propierties of meandering rivers», *Rivers meandering*, Proceedings of the rivers'83 Conference, ASCE, 1-15, N. Orleans.

BEIDGW, J. S., SMITH, N. D., TRENT, I., GABEL, S. L., BERNSTEIN, P. (1986), «Sedimentology and morphology of a low sinuosity river: Calamus River, Nebraska Sand Hill», *Sedimentology*, 33, 851-870.

CARRILLO, L., ARCHE, A. (1982), «Los depósitos de grano grueso del río Jarama al Sur de Velilla de S. Antonio», *IX Congreso Español de Sedimentología*, Salamanca, 243-260.

CROWLEY, K. D. (1983), «Large scale bed configurations (macroforms), Platte River

basin, Colorado and Nebraska: primary structures and formative processes», *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 117-133.

GARZÓN, G., ALONSO, A., LÓPEZ, J. y ARCHE, A. (1990), «Desbordamientos en el río Jarama (Prov. de Madrid) e interferencia humana en la llanura de inundación», *IV Reun. Nac. Geol. Ambiental y Ordenación Territorio*, 259-270, Gijón.

GARZÓN, G., MARTÍNEZ GOYTRE, J. y ALONSO, A. (1992), «Los cambios antrópicos en la dinámica del río Jarama (Madrid) como modificadores del riesgo de inundaciones», *Simp. III Congreso Geológico de España*, 628-638, Salamanca.

GILVEAR, D. J. (1993), «River management and conservation issues on formerly braided river systems; the case of the River Tay, Scotland», en J. L. Best & C. S. Bristow eds., *Braided Rivers. Geol. Soc.*, Spec. Pub., núm. 75. 231-240, Londres.

ITGE (1993), «*Mapa Geológico de España 1:50.000, Magna, Hoja núm. 558 Majadahonda*», Serv. Public. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

MIALL, A. D. (1977), «A review of the braided river depositional environment», *Earth Sci. Rev.*, 13, 1-62.

— (1996), «The Geology of fluvial deposits», *Springer Verlag*, Berlin, 582 p.

OUCHI, S. (1985), «Response of alluvial rivers to slow active tectonic movement», *Geol. Soc. Am. Bull.*, 896, 504-515.

SCHUMM, S. A. (1981), «Evolution and response of the fluvial System, sedimentolologic implications», *SEPM Spec. Pub.*, 31, 19-29.

SMITH, N. D. (1971), «Transverse bars and braiding in the Lower Platte River, Nebraska», *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 3407-3420.

— y SMITH, D. G. (1984), «Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff. Alberta», *J. Sed. Petrol.*, 50, 157-164.

Manuscrito recibido: 14-6-1996
Manuscrito aceptado: 15-7-1996