

MODIFICACIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIÓN DE GIRONA POR EL CRECIMIENTO DE LA ISLA DEL TER

**Martín Vide, Juan P.¹; Martín Moreta, P.²; Roca Collell, M.¹; Simarro Grande, G.²;
López Querol, S.², Mazza de Almeida, G.¹**

(1) Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marina i Ambiental.

(2) Universidad de Castilla-la Mancha. Departamento de Ingeniería Civil.

RESUMEN

Se describe el crecimiento de cota y de la vegetación en una isla fluvial en Girona, en la confluencia de los ríos Onyar y Ter. Este hecho se relaciona con la regulación del río Ter con presas de embalses desde 1968. Se prueba la influencia de este crecimiento en los niveles de avenida que afectan a Girona por medio de un modelo hidrodinámico 1D. Con un cálculo integrado de transporte sólido se justifica el crecimiento de la isla en los últimos años y su evolución futura.

SUMMARY

Flooding risk modified due to the aggradation of an island (River Ter, Girona, Spain).

The aggradation and the vegetation bloom in a fluvial inland close to Girona (Spain) where rivers Onyar and Ter meet is described. This fact is related to the Ter river regulation by means of dams since 1968. A 1D hydrodynamic model is used to show the effect of the aggradation and the vegetation on the flood levels concerning Girona. A bulk computation of sediment transport gives similar results to the observations in the last years and is used to ascertain the future evolution of the island.

Fecha de recepción: febrero 2004.

Fecha de admisión: marzo 2004.

I. INTRODUCCIÓN: LA ISLA DEL TER

La ciudad de Girona es la población más importante bañada por el río Ter. Su emplazamiento es singular pues se encuentra atravesada por el río Onyar, que desemboca en el Ter por su margen derecha, en las afueras de la ciudad. La foto aérea del año 2001 (fig. 1) muestra los dos ríos y una masa de vegetación en el lugar de su confluencia, así como la ciudad consolidada y el parque de la Devesa en la margen derecha del Ter.

La planicie surcada por los dos ríos ha sido testigo de numerosos cambios de cauce y obras humanas, documentadas al menos desde el siglo XVII (Catàleg, 1992). Los cauces se han reunido en distintos lugares, formando varias islas diferentes. En cuanto a la inundación, suele decirse que es el Onyar y no el Ter el que inunda Girona. Las fuentes históricas registran numerosas inundaciones producidas por ejemplo en la Devesa (Llasat y col., com. per.).



Figura 1. Foto aérea de Girona (2001).



Figura 2. Mapa del área inundable por el río Onyar para avenidas de diferentes periodos de retorno. Tomado de Ribas y col. (1997). Fuente: Ajuntament de Girona. Pla especial d'inundacions, 1993-1994.

El papel principal del Onyar en las inundaciones se pone de relieve en la figura del área inundable según el Ayuntamiento de Girona (Ribas y col, 1997), que comprende la Devesa y el centro histórico (fig. 2). En esta figura se distingue más claramente que la masa oscura de vegetación de la fig. 1 es una isla formada en la desembocadura del Onyar en el Ter.

En la fotografía aérea de 1957 es notable la apariencia de actividad de los depósitos aluviales en la confluencia del Onyar y el Ter, con una morfología trezada y huellas de varios brazos en la zona de la isla. El color claro informa de que los materiales aluviales son muy móviles, es decir son puestos en movimiento con frecuencia por las avenidas. En cambio, en la fotografía aérea de 1986 se distinguen netamente dos brazos, entre los cuales la isla tiene un color oscuro propio de la vegetación. Esto indica la estabilidad de estos depósitos, que no se habrían vistos sometidos a la acción de las avenidas con la misma frecuencia que en el pasado. En el mismo sentido, la fig. 3 reproduce una fotografía (de Camps y col., 1976) de la isla en la confluencia del Onyar y el Ter, vistos desde hacia arriba. La isla parece un depósito reciente y móvil, ya que apenas se encuentra cubierta de vegetación, mucho menos que en la foto actual (fig. 4) tomada desde el mismo punto.



Figura 3. Fotografía de la confluencia del Ter y el Onyar, mirando a aguas arriba, desde la montaña de Montjuic, tomada de De Camps (1976).

El contraste entre la fig. 3 y la fig. 4 llama poderosamente la atención sobre el nuevo espacio fluvial creado en unos 30 años. La isla se ha poblado de frondosa vegetación y es hoy considerada como un paraje natural que merece protección. Se cree también que la isla ha crecido en tamaño, remontando aguas arriba. Las presas de Sau, Susqueda y El Pasteral, se construyeron en el río Ter aguas arriba de Girona en el periodo comprendido entre las dos fotos. La inferior (El Pasteral) con sólo 2 Hm³ de capacidad de embalse data de 1962, la superior (Sau) de 168.5 Hm³ data de 1963 y la más reciente, terminada oficialmente en 1968, es la de Susqueda (233 Hm³). El 12 de octubre de 1970 se produjo una grave avenida del río Onyar en Girona, que a diferencia del Ter no tiene regulación alguna (no tiene presas), a raíz de la cual se ejecutaron (hacia 1970-72) las obras de encauzamiento cuyo remate se ve en el cuadrante superior izquierdo de la fig. 3.

Las dos fotos (figuras 3 y 4) nos sitúan ante uno de los frecuentes casos recientes en los que la vegetación prolifera mucho en un río debido a la ausencia de crecidas fuertes capaces de arrancarla o eliminarla. Esta falta de crecidas capaces de movilizar el lecho y arrastrar la vegetación sería consecuencia de la regulación del río Ter por las presas de Sau y Susqueda. Por otro lado, el proceso vegetativo causaría además un cierto crecimiento del suelo vegetal. La preocupación por el efecto que podía tener el crecimiento de la isla en el riesgo de inundación de la ciudad de Girona movió a la administración hidráulica de las cuencas internas de



Figura 4. Foto tomada desde el mismo lugar que la figura 3 (Montjuïc) en abril de 2003.

Catalunya (la *Agència Catalana de l'Aigua*) a pedir un estudio, dentro del trabajo de Planificación del Espacio Fluvial del Bajo Ter. Este artículo presenta un resumen de este estudio.

II. INFLUENCIA DE LA ISLA EN LOS NIVELES DE INUNDACIÓN EN GIRONA

La primera parte del estudio consiste en cuantificar la influencia de la isla en los niveles de inundación de Girona. La inundación, causada por el río Onyar, será función de dos variables: el caudal del río Onyar (que llamamos Q') y el nivel de agua en la desembocadura en el río Ter. Este nivel viene determinado por el tamaño de los cauces, la resistencia al flujo de los materiales aluviales y de la vegetación y por cualquier otra circunstancia geométrica o de resistencia al paso del agua que tenga lugar aguas abajo del punto de desembocadura del Onyar. Naturalmente, también este nivel será función del caudal de agua total, que es la suma del caudal del Ter (que llamamos Q) y del del Onyar (Q'), es decir de $Q+Q'$. Por lo tanto, la inundación es también, de este modo, función del caudal del Ter (Q).

Para el estudio de los niveles se ha usado un modelo unidimensional (1D) de lecho fijo. La alternativa habría sido usar un modelo bidimensional (2D). La experiencia en otros casos semejantes (Martín Vide y col., 2002) lleva a señalar que la ventaja de usar ecuaciones en dos dimensiones puede verse contrarrestada por la dificultad del cálculo con una topografía

compleja. Un modelo 1D utilizado con criterio e ingenio puede aprovechar su ventaja de incorporar cualquier topografía así como obras locales (azudes, puentes,...) y alcanzar resultados precisos, detallados e incluso acercándose a lo que puede llamarse un cálculo «cuasi-bidimensional» (cuasi-2D). Un ejemplo de esto último es precisamente una isla, ya que un modelo 1D se puede aplicar a cada brazo. La naturaleza del flujo en la isla del Ter es sólo «moderadamente» bidimensional. El río encuentra allí una región más ancha de lo normal, coincidiendo con la desembocadura del Onyar. Un estudio con un modelo 2D aportaría una mejor descripción global de las direcciones de flujo, cuando la isla está sumergida total o parcialmente (Fdez.Bono y col., 2003). El modelo usado es Hec-Ras de régimen permanente. Como la longitud de estudio es de 1 km aproximadamente, el efecto de laminación es escaso y por ello el uso de un caudal variable no está justificado.

La fig. 5 es un esquema del cálculo realizado. Donde comienza la isla (punto P_2) el Ter se divide en dos brazos: por la izquierda un brazo principal y por la derecha un brazo menor (se lleva un caudal que llamamos q) que se reúne con el río Onyar y está algo remansado por la existencia del azud de Pedret. El caudal por el brazo derecho es $Q' + q$ y por el izquierdo $Q - q$. Además, en situación de aguas altas puede haber una transferencia de caudal (que llamamos T) casi siempre en el sentido de la figura. Se debe a que el brazo derecho, que se encuentra

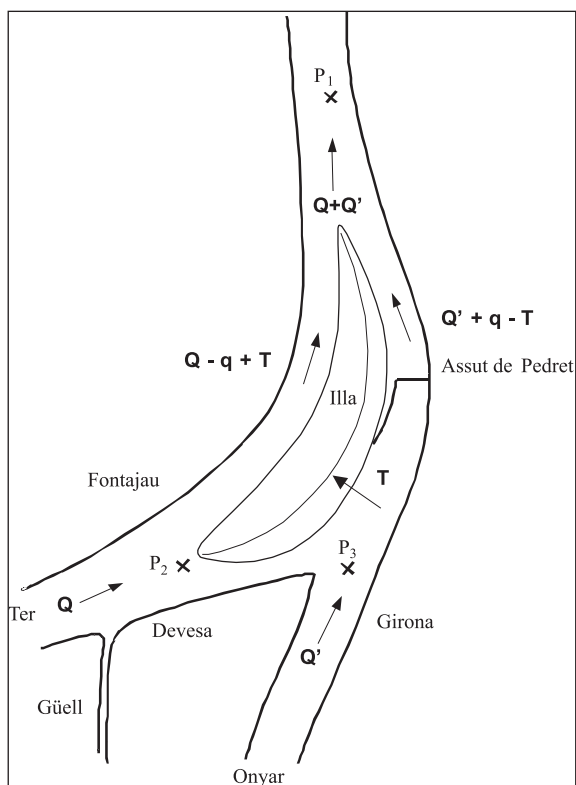


Figura 5. Esquema conceptual del cálculo hidrodinámico de la isla del Ter. Explicación en el texto.

más alto, rebosa y desborda sobre la isla. Con niveles aún más altos la misma transferencia de la corriente derecha a la izquierda sigue ocurriendo con la isla sumergida. Cuando en P_1 se reúnen todas las aguas el caudal es $(Q-q+T) + (Q'+q-T) = Q+Q'$, es decir Ter + Onyar.

La distribución anterior de los caudales respeta la llamada ecuación de conservación de la masa o de continuidad y sirve para dar los datos de entrada al modelo Hec-Ras. La ecuación que calcula el modelo es la de conservación de la energía del movimiento del agua. Empezando en P_1 , el cálculo consiste en ir sumando las pérdidas de energía hasta llegar al punto P_2 donde comienza la isla. Esto se hace por el camino izquierdo y por el camino derecho, pero en P_2 sólo puede haber una energía sea cual sea el camino. Esta condición obliga a realizar el cálculo en forma iterativa, variando los caudales q y T que actúan como incógnitas hasta alcanzar una sola energía en P_2 . El modelo incorpora toda la información geométrica por medio de secciones transversales, la de resistencia al flujo por medio de coeficientes de rugosidad y tiene también condiciones de cálculo «interiores» como una ecuación de desagüe para el azud y otra para la orilla derecha de la isla que controla la

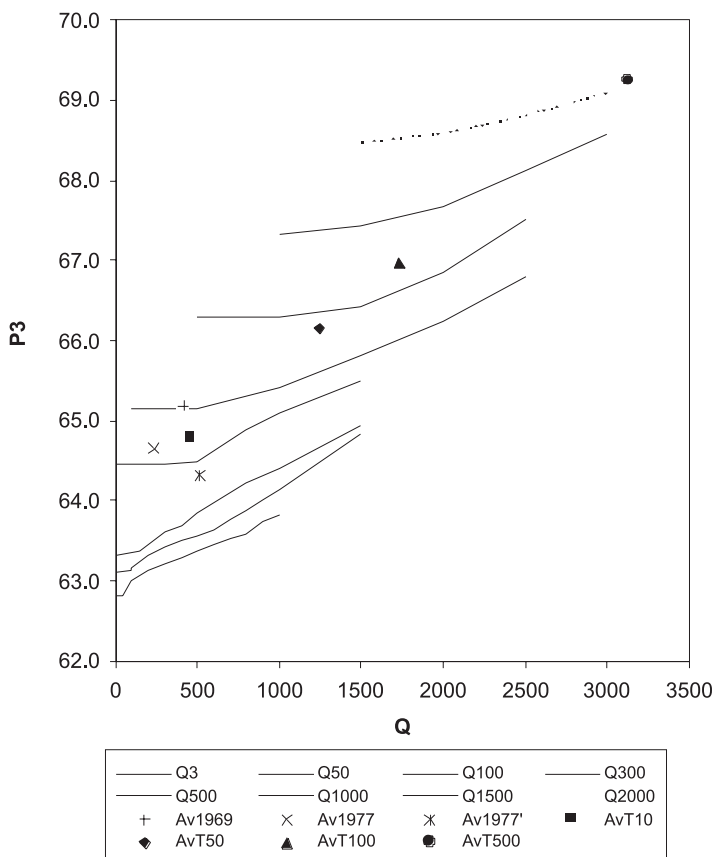


Figura 6. Resultados del análisis hidrodinámico: nivel en la desembocadura del Onyar en función del caudal del Ter, para distintos valores del caudal del Onyar (distintas curvas). Explicación en el texto.

transferencia T. El resultado del cálculo son todos los niveles y caudales, pero el más importante es el nivel en el punto P_3 , donde desemboca el Onyar, ya que este nivel, como se ha indicado, es el que influye en la inundación de Girona.

El resultado del cálculo se ofrece en la fig. 6. Ante la necesidad de representar el nivel en la desembocadura del Onyar como función de los caudales de Onyar y Ter, se ha optado por presentar el nivel en P_3 en ordenadas y el caudal Q del río Ter en abscisas. La tercera variable, Q' caudal del Onyar, interviene en forma de una familia de curvas, de la que se representan 8 valores: 3, 50, 100, 300, 500, 1000, 1500 y 2000 m^3/s . Hay 7 resultados especiales que se representan como puntos sueltos en la figura (avenidas de abril de 1969 con $Q = 412$ y $Q' = 552$ m^3/s y dos en enero de 1977 con $Q = 235$ y $Q' = 380$ m^3/s la primera y $Q = 514$ y $Q' = 244$ m^3/s la segunda y avenidas con periodos de retorno 10, 50, 100 y 500 años según cálculos hidrológicos –ver tabla 1, más adelante).

La influencia relativa de los caudales del Onyar y el Ter se observa en la fig. 6. La influencia del Onyar es evidente porque a mayor caudal de este río (desde 3 hasta 2000 m^3/s) más alta es la curva. La influencia del Ter se manifiesta en que las curvas de la figura no son en general horizontales sino crecientes. Con valores pequeños de Q las curvas sí son horizontales: en esos tramos $q = 0$, es decir el Ter no es capaz de enviar agua por el brazo derecho, por lo que no consigue influir en el nivel en P_3 . En estas circunstancias la inundación de Girona es exclusivamente responsabilidad del río Onyar. Mientras el caudal del Onyar no es muy elevado (hasta 300 m^3/s inclusive), se distingue claramente el punto en que la curva deja de ser horizontal para comenzar a ser creciente. Este punto se desplaza a la derecha a mayor caudal del Onyar, es decir que al Ter «le cuesta más» llegar a influir en el nivel en P_3 conforme es mayor el caudal del Onyar y por tanto la inundación de Girona sigue determinada sólo por el río Onyar. Para caudales elevados del Onyar (a partir de 500 m^3/s) la influencia del Ter en los niveles no parece comenzar en un punto determinado. Esto se explica porque el Ter deja de influir sólo por medio del caudal q en la bifurcación, para influir también porque todos los niveles en la isla y aguas abajo son muy elevados, causando el anegamiento o inmersión del azud de Pedret y de la isla.

La influencia del Ter en el nivel se puede cuantificar como la diferencia de ordenada de una misma curva entre el punto en que corta el eje de ordenadas ($Q = 0$) y otro punto a la derecha, por ejemplo el último. Leyendo de este modo una curva, por ejemplo la del 100 m^3/s en el Onyar, véase que la diferencia de nivel entre el Ter no crecido (menos de 100 m^3/s) y el Ter crecido (1500 m^3/s) es del orden de 1.6 m. Por lo tanto, el nivel en la desembocadura del Onyar y el riesgo de inundación de Girona no son en absoluto indiferentes al caudal circulante por el río Ter. Dicho en términos intuitivos: la cantidad de agua que el Ter no tiene más remedio que «enviar» por el brazo derecho, ya que baja tan cargado, dificulta el desagüe del Onyar, lo que se manifiesta en niveles más elevados en su desembocadura y mayor riesgo, por tanto, en Girona.

A partir de este resultado, en el trabajo completo (UPC, 2003) se estudia la repercusión del nivel de agua en P_3 en los niveles en el centro de la ciudad. También se ha estudiado la influencia del crecimiento «físico» de la isla, consistente en un aumento de cota en toda la isla (acreción) de 20 cm y 40 cm, y del crecimiento «biótico» o de vegetación, que implique una modificación de la resistencia al flujo. La combinación de pradera (coeficiente de rugosidad de Manning, $n = 0.035$) y bosque o matorral ($n = 0.075$) en determinadas

proporciones, que caracterizan la situación actual, se ha sustituido por un valor único $n = 0.075$, que significa un bosque o matorral espeso extendido a toda la isla. Igualmente se ha estudiado el caso de tener $n = 0.035$ (pradera) en toda la isla, como significativo de una tala de la vegetación.

En la tabla 1 se presentan los resultados en forma de variación del nivel (ΔH) en P_3 según la variación física o biótica introducida. Se anota también la cota absoluta inicial. Los casos estudiados son los de periodos de retorno (T) 10, 50, 100 y 500 años. El incremento del riesgo parece, en nuestra apreciación, no muy alto (para el crecimiento físico y biótico simultáneo pueden sumarse los resultados). Análogamente, la medida de talar la vegetación no parece muy eficiente.

Tabla 1

INCREMENTO DE LOS NIVELES EN LA DESEMBOCADURA POR EFECTO DEL CRECIMIENTO FÍSICO (ACRECIÓN) Y BIÓTICO

| T (años) | Q (m ³ /s) Ter | Q' (m ³ /s) Onyar | nivel P_3 | ΔH (cm) si cota + 20cm | ΔH (cm) si cota + 40cm | ΔH (cm) si n=0.075 | ΔH (cm) si n=0.035 |
|----------|------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 10 | 460 | 390 | 64.78 | + 9 | + 18 | 0 | - 7 |
| 50 | 1235 | 920 | 66.17 | + 7 | + 14 | + 8 | - 4 |
| 100 | 1725 | 1225 | 66.98 | + 4 | + 8 | + 15 | - 4 |
| 500 | 3120 | 2070 | 69.26 | 0 | + 1 | + 14 | - 12 |

III. CRECIMIENTO DE LA ISLA POR LA APORTACIÓN SÓLIDA

En el cálculo del apartado anterior se ha usado un modelo de lecho fijo, es decir sin movilidad del fondo. La segunda parte del estudio intenta cuantificar el crecimiento físico experimentado por la isla, si es el caso, y darle una explicación, que sirva también como pronóstico de su evolución futura. Esto se basa en un estudio del transporte sólido de los ríos Ter y Onyar a la altura de Girona y de su eventual sedimentación en la isla.

Las cuencas del Onyar y del Ter son comparables en cuanto a que la primera representa el 75 % del área de la del Ter tras el último embalse (El Pasteral). Ahora bien, en líneas generales el Ter no tendrá crecidas como en el pasado mientras el Onyar, que no tiene regulación alguna, sí. Otra diferencia importante entre los dos ríos es la naturaleza de sus cauces. Las muestras granulométricas extraídas del cauce del río Ter y de sus afluentes principales aguas abajo de El Pasteral (Brugent, Osor y Llèmena), permiten clasificarlos como ríos de gravas muy gruesas. Las muestras del Onyar y sus afluentes (como la riera de La Gotarra) permite clasificarlos como ríos de gravas finas o arenas gruesas. La tabla 2 recoge los parámetros granulométricos principales. Hay que destacar además que el cauce del río Ter y sus afluentes se encuentra acorazado, es decir las fracciones más gruesas del material aluvial forman en superficie una coraza que cubre al resto del material. El río Onyar y sus afluentes por el contrario no está acorazado. La red hidrográfica y los puntos de toma de muestras se representan en la fig. 7.

Tabla 2

PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS DE LAS MUESTRAS. LOS LUGARES ESTÁN SEÑALADOS EN LA FIG.7. D_{50} ES LA MEDIANA O PERCENTIL 50 DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA (IDEM PARA EL 84 Y EL 16%). σ ES LA DESVIACIÓN TÍPICA GRANULOMÉTRICA, DEFINIDA COMO $(D_{84} / D_{16})^{0.5}$.

| Lugar | Brugent 2 | Brugent 3 | Osor | Llémena | Ter 1 | Ter 2 | Ter 3 | Gotarra 1 | Gotarra 2 | Onyar 1 | Onyar 2 | Onyar 3 |
|----------|-----------|-----------|-------|---------|-------|-------|-------|-----------|-----------|---------|---------|---------|
| D_{50} | 14.2 | 14.6 | 44.3 | 17.0 | 21.6 | 92.8 | 94.1 | 1.76 | 2.13 | 3.28 | 2.48 | 1.81 |
| D_{16} | 0.76 | 1.41 | 1.54 | 1.11 | 1.79 | 3.94 | 1.43 | 0.63 | 0.71 | 0.50 | 0.95 | 0.45 |
| D_{84} | 62.9 | 31.7 | 122.8 | 50.6 | 78.8 | 189.7 | 216.0 | 3.69 | 5.0 | 16.7 | 16.0 | 12.4 |
| σ | 9.1 | 4.7 | 8.9 | 6.8 | 6.6 | 6.9 | 12.3 | 2.42 | 2.66 | 5.8 | 4.1 | 5.2 |

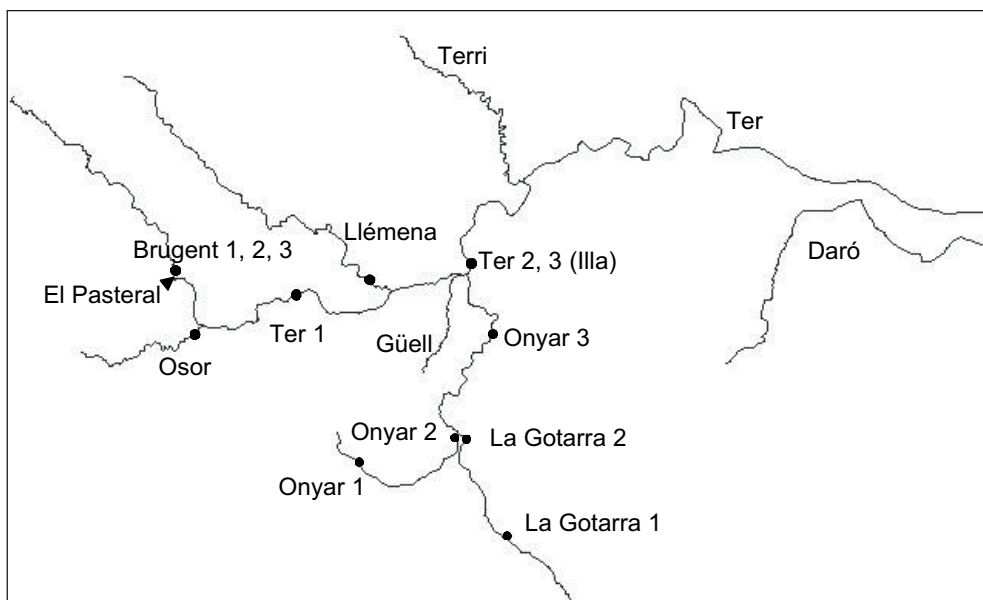


Figura 7. Plano de la red hidrográfica del río Ter y Onyar. «Illa» es la isla del Ter en Girona. Se señalan los lugares de toma de muestras granulométricas (tabla 2). El Pasteral es la última presa.

Por todo ello, podemos pensar que la aportación sólida a la isla se debe componer de dos fracciones distintas: gravas muy gruesas del Ter por una parte y gravas finas o arenas gruesas del Onyar por otro. Una imagen del cauce del Ter cerca de la isla se da en la fig. 8 y una del cauce del Onyar en la fig. 9. El contraste entre las gravas del primero y las arenas del segundo es muy marcado.



Figura 8. Aspecto del cauce del río Ter cerca de la isla.



Figura 9. Aspecto del cauce del río Onyar cerca de la isla.

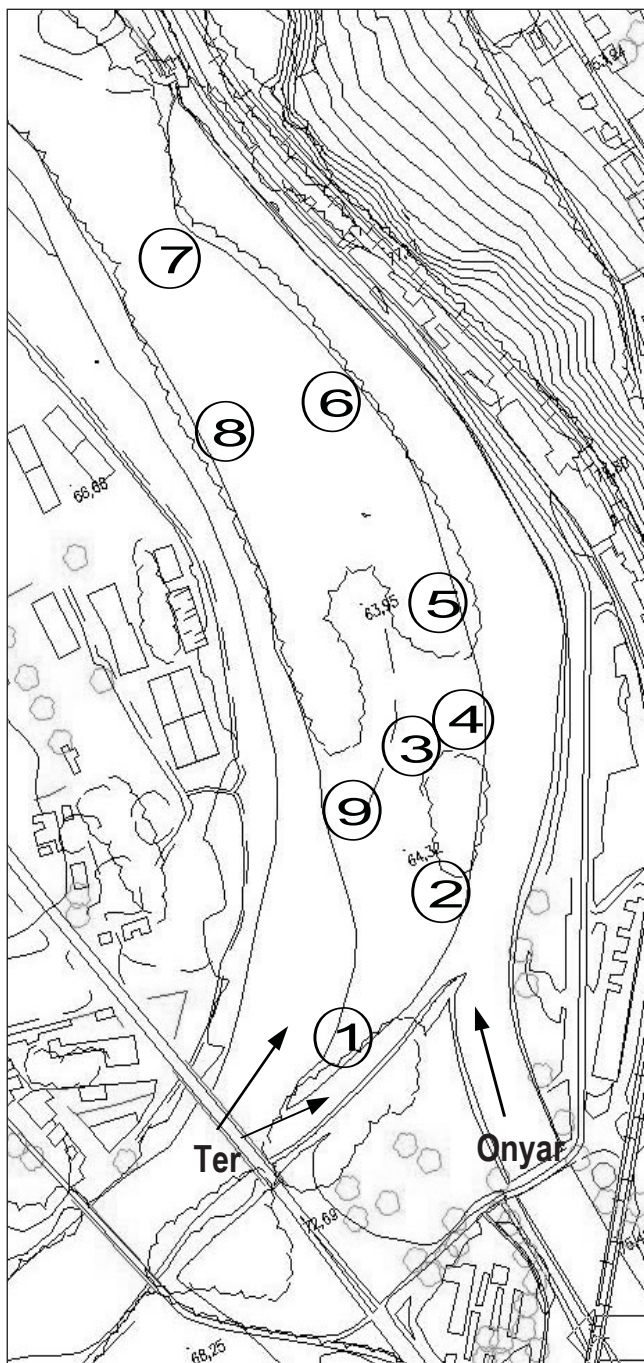


Figura 10. Plano de detalle de la isla con indicación de los lugares de las catas.

El 26 de marzo de 2003 se realizó un trabajo de reconocimiento de los materiales de la isla, ejecutando 9 catas de unos 3 m de profundidad. Los lugares de las catas se representan en la fig. 10. Se escogieron con el criterio de explorar los extremos de la formación aluvial y de llegar hasta el borde de los dos brazos. Los objetivos eran analizar la composición de los depósitos, la presencia relativa de gravas y arenas y tratar de determinar su edad. El material en todos los puntos resulta bastante similar: una mezcla de gravas (y bolos) con arenas y materiales más finos. Se apreciarían leves diferencias de proporción relativa entre uno y otro material: así las catas 1, 6, 7 y 9 dan una proporción algo mayor de gravas y bolos, mientras las catas 2, 3, 4, 5 y 8 dan una proporción algo mayor de arenas y finos, pero esto no es una segregación clara entre materiales arenosos aportados por el Onyar y materiales gruesos aportados por el Ter, ni siquiera al borde del Onyar con las cotas más altas. En las catas 1, 2, 3 y 4 (situadas aguas arriba) se encuentran restos de actividades humanas modernas (lo que en conjunto llamaríamos «basura») en toda o casi toda su profundidad, lo que prueba que se trata de depósitos de una edad máxima de unos 40 años. En el resto de catas estos restos no se encuentran. Esto prueba el crecimiento moderno de la isla hacia aguas arriba (ya observado en las descripciones geomorfológicas al comparar fotos aéreas de distintas fechas), bastante claro también en las figs. 3 y 4.

El estudio del transporte sólido que llega a la isla se plantea por un lado como estudio histórico de los volúmenes aportados por los ríos Ter y Onyar desde 1967 y por otro como estudio probabilístico de las aportaciones sólidas en un año cualquiera futuro, determinadas como suma de los volúmenes «seguros» traídos por las aguas normales de cada año y los volúmenes «probables» traídos por las avenidas que pueden ocurrir cada año con cierta probabilidad. El estudio histórico sirve de comparación con los cambios observados en la isla. El estudio probabilístico, referido a un año futuro cualquiera, da una idea del ritmo anual de llegada de sólidos a la isla por efecto principalmente de las crecidas. No se cuenta con ninguna medida de caudal sólido, de modo que el estudio es teórico.

El cálculo realizado es integrado y simplificado espacial y temporalmente. Como se verá enseguida, es preciso estudiar toda la red hidrográfica, por lo que la toma de muestras (fig. 7) se extendió por los dos ríos y sus afluentes. Para abordar el estudio del transporte sólido en centenares de kilómetros de una red hidrográfica sería extremadamente complejo (e ineficaz) que tuviera una base física, es decir que fuera distribuido espacialmente como lo es por ejemplo Hec-Ras. El desconocimiento y las incertidumbres sobre el transporte sólido en sistemas naturales irregulares (con cauce y llanuras, con o sin vegetación, etc.) son tan grandes que parece inútil esa clase de modelación. Por ello el modelo se puede considerar 1D, pero no distribuido sino integrado, lo cual significa que la realidad física se simplifica por medio de unos pocos tramos, cada uno de características más o menos uniformes. Temporalmente, se usan caudales diarios en el estudio histórico e hidrogramas en el estudio probabilístico.

El modelo realiza un cálculo basado en la ecuación de conservación de la masa, expresada en cantidades finitas (no diferencial) y aplicada a tramos de río. Se estudia sólo el transporte con origen en el cauce, es decir se excluyen los materiales más finos. Estos materiales, con origen en la cuenca, no sedimentarían en ningún caso en la isla. Se hace la hipótesis de que la única región del flujo que transporta sedimento es el cauce principal del río, no su llanura de inundación. Al aplicar las fórmulas de transporte sólido (de Meyer-Peter y Müller y de Parker –Martín Vide, 2002) se distinguen la capacidad y la disponibilidad, siendo el transporte

real la menor de esas dos cantidades. La capacidad la dan las fórmulas. La disponibilidad se puede calcular también con las fórmulas, pero con los datos de un tramo superior, donde el material aluvial sea de tamaño diferente, así como diferentes sean la sección, la pendiente o el caudal. Así, por medio de la recurrencia al tramo superior del lugar de estudio, se da al cálculo del transporte sólido su dimensión de problema espacial extendido progresivamente a toda la red de drenaje de un río. Ello hace relevante la información geométrica, hidrológica y granulométrica de toda la red hidrográfica. En este caso se deberá hacer remontando desde la isla por el cauce del Onyar y del propio Ter (fig. 7).

En la tabla 3 se presentan los resultados del cálculo en m^3 , para los cuatro periodos de retorno utilizados y para los datos de caudales medios diarios desde 1968 hasta la actualidad. Se consignan en la tabla la fórmula de Parker y las dos modalidades de la fórmula de Meyer-Peter y Müller: MPM1 es la fórmula con fondo plano (mayor caudal sólido), mientras MPM2 es la fórmula con fondo ondulado con formas de fondo máximas (menor caudal sólido).

Tabla 3
VOLÚMENES SÓLIDOS QUE RESULTAN DEL CÁLCULO DEL TRANSPORTE SÓLIDO QUE LLEGA A LA ISLA (EN M^3). EXPLICACIÓN EN EL TEXTO

| T (años) | Ter | | | Onyar | | |
|-------------------|--------|------|-------------|--------|-------|--------|
| | MPM1 | MPM2 | Parker | MPM1 | MPM2 | Parker |
| 500 | 23885 | 3571 | 9558 | 10469 | 2797 | 6109 |
| 100 | 14491 | 2047 | 4734 | 7345 | 2020 | 4047 |
| 50 | 10960 | 1483 | 3003 | 6059 | 1700 | 4284 |
| 10 | 3151 | 328 | 262 | 3158 | 978 | 1454 |
| Q diario 68-03 | 209488 | 5279 | 6071 | 119200 | 27087 | 40688 |

Los resultados de la fórmula de Parker quedan comprendidos entre MPM1 y MPM2. Como las dos modalidades de MPM significan dos extremos de mucho y poco transporte, resulta reconfortante observar que la fórmula de Parker queda entre ambos valores. Por ello, nos inclinamos a considerarla como buena para estos ríos. Con la fórmula de Parker, el volumen anual seguro, obtenido a través del estudio histórico 1968-2003 (tabla 3) sin más que dividir por el número de días usados en el cálculo y multiplicar por los 365 de un año, resulta para el Ter de $240 m^3$ al año y para el Onyar $2290 m^3$ al año. A este valor seguro se le podría sumar un volumen anual probable obtenido como suma de los volúmenes aportados por distintas avenidas (tabla 3), ponderados con su probabilidad de ocurrencia.

La diferencia de más de un orden de magnitud en el transporte anual entre los dos ríos indica que el río Onyar, a diferencia del Ter, tiene material más fino que es transportado durante bastantes días al año, acumulando al final un volumen importante. El mismo hecho se puede ver en otro detalle en la tabla 3: el volumen sólido de 35 años es en el Ter no mayor que el de una avenida, pero en el Onyar sí es mucho mayor. Esto se puede relacionar con el acorazamiento en los cauces del Ter, inexistente en el Onyar. La coraza actúa sobre el transporte real como una condición de disponibilidad restringida o nula, restricción además

variable según la historia reciente del río, o sea según el tiempo transcurrido desde la última vez en que resultó destruida. El cálculo del volumen aportado por las avenidas es por ello más fiable en el río Onyar no acorazado que en el río Ter (acorazado).

Un cálculo aproximado del volumen depositado por el Ter en la segunda mitad del s. XX da entre 1500 y 3000 m³. Esto correspondería al crecimiento de la isla hacia arriba, por el depósito observado de gravas gruesas. Es el único dato real relacionado con el transporte sólido. Este valor es congruente con el resultado del cálculo anterior (tabla 3) donde se estima que el transporte del Ter puede haber sido de unos 6000 m³. El cálculo también prueba que los caudales medios diarios desde 1968 apenas han sido capaces, en teoría, de mover y romper las corazas del Ter y sus afluentes, aunque sí probablemente algunas crecidas. A pesar del acorazamiento de estos cauces, el Ter ha contribuido al crecimiento de la isla en los últimos años, incluido el periodo de funcionamiento de los embalses. En consecuencia, el proceso de crecimiento puede continuar. En cambio, sólo una parte insignificante del gran volumen de arenas venido por el Onyar en el mismo tiempo (40700 m³) ha sedimentado en la isla contribuyendo a su crecimiento.

Este volumen de sólidos recibido en el pasado (40700 m³) y que recibe la isla anualmente (2290 m³) por el Onyar llegaría transportado por flujos no extraordinarios que desbordarían con poca frecuencia los cauces principales. Pensamos que la mayoría del material del Onyar queda retenido por el azud de Pedret, es decir en el cauce principal del brazo derecho. Como la superficie aproximada de este brazo es 600 (longitud) × 40 (anchura) m², si cada año se depositara el 100% del volumen aportado por el Onyar se produciría un relleno de unos 10 cm al año. Sin embargo, cabe imaginar que algunos caudales elevados den lugar a que parte del sedimento escape. En ese caso ese material puede sedimentar en la isla. El material aportado por el río Ter por ser más grueso sedimentaría preferentemente como depósitos de margen de cauce (acreción lateral).

IV. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Los puntos más interesantes del trabajo se destacan a continuación:

1. La confluencia del Ter y el Onyar en Girona ha sido un lugar muy móvil desde el punto de vista de la dinámica fluvial. Hoy esta movilidad está restringida pero se ha comprobado que un elemento del sistema, la llamada isla del Ter, ha crecido hacia aguas arriba en las últimas décadas del s. XX.
2. Es obvio y llamativo el crecimiento de la vegetación en la isla desde finales de los años 60 del s. XX, cuando se acabó la construcción de las presas de Sau y Susqueda hasta hoy. Este crecimiento biótico implica un mayor obstáculo al flujo. El crecimiento de la vegetación se ha de vincular a la falta de crecidas en el río Ter, que en el pasado la arrancaban y arrastraban con regularidad. Tanto el crecimiento «físico» como el biótico incrementan el riesgo de inundación de Girona (tabla 1).
3. El caudal del río Ter influye en la desembocadura del río Onyar. A mayor caudal del Ter, mayor es el caudal que se deriva por el brazo derecho de la isla para engrosar el del Onyar y, con ello, mayor es el nivel de agua en el punto de desembocadura, o sea mayor es el riesgo de inundación en Girona. Para caudales muy grandes del Ter, la

inundación de toda la isla eleva también el nivel en el punto de desembocadura. Los niveles se representan en la fig. 6.

4. El transporte sólido de los ríos que confluyen en la isla queda en parte retenido en ella, es decir contribuye a su crecimiento. El transporte más cuantioso es el del río Onyar. Trae unos 2300 m³ de material no muy grueso cada año, que pensamos irá restando capacidad al brazo derecho embalsado por el azud de Pedret. Hoy el brazo derecho de la bifurcación del Ter lleva sólo un 20% del caudal total. Su capacidad puede irse reduciendo con el tiempo y la cota del fondo ir subiendo, debido a este transporte anual del Onyar, hasta convertirse en un cauce «colgado». Parece en marcha un proceso de pérdida de importancia del brazo derecho a favor del brazo izquierdo de la isla.
5. El transporte sólido del río Ter parece totalmente frenado por la regulación hidrológica de los embalses y el acorazamiento que han experimentado los lechos de los cauces (del Ter y sus afluentes Brugent, Osor y Llémena). Su aportación sólida anual (sin crecidas) es despreciable. En crecidas fuertes llega a romper algunas corazas y entonces transporta cantidades comparables a las del Onyar. Depositaría estos materiales en la isla como barras o depósitos de acreción lateral, es decir contribuiría más a extender la isla que a subirla de cota, a diferencia del Onyar. De hecho, en la segunda mitad del s.XX podría haber depositado un volumen entre 1500 y 3000 m³. Este valor es congruente con el resultado de cálculo del transporte del Ter.
6. La metodología usa un análisis hidrodinámico 1D, realizado con Hec-Ras, de una manera que reproduce las propiedades complejas del flujo en una isla desbordable, sobre la que hay una transferencia de agua del Onyar al Ter. Usa, en segundo lugar, un modelo integrado de transporte sólido en la redes hidrográficas completas del Ter y el Onyar. La fórmula de Parker es la que ofrece más indicios de adecuación a estos ríos, de material aluvial muy grueso (Ter) y mediano (Onyar). El trabajo de campo en granulometrías y catas confiere más seguridad al modelo de transporte sólido.

BIBLIOGRAFÍA

- «CATÀLEG de plànols de la Ciutat de Girona des del segle XVII al XX». Demarcació de Girona del Col·legi d'Arquitectes de Catalunya i l'Ajuntament de Girona (1992).
- DE CAMPS, J., CAMPRUBÍ, R. (1976): *El Ter*, edicions Destino, Barcelona. La fotografía de la Fig. 3 se encuentra en las páginas 258-259.
- FERNÁNDEZ BONO, J.F.; GRAU GIMENO, P. (2003): «Peak discharge estimation for historical flood events» en Thorndycraft, V.R. et al. *Palaeofloods, Historical Data and Climatic Variability*. CSIC, Madrid.
- LLASAT, C., BARRIENDOS, M.: Resultados del proyecto de investigación europeo Sphere para el río Ter. Comunicación personal.
- MARTÍN VIDE, J.P., LÓPEZ QUEROL, S., MARTÍN MORETA, P., SIMARRO GRANDE, G., BENITO FERRÁNDEZ, G. (2002): «Uso de modelo uni- y bidimensionales en llanura de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la reina». *Ingeniería del Agua*, 10 (1), pp. 49-58.

- MARTÍN VIDE, J.P. (2002): *Ingeniería de Ríos*. Edicions UPC, Barcelona, 331 pp. También *Ingeniería fluvial*, edicions UPC, Barcelona 1997, 209 pp.
- RIBAS, A.; ROSET, D. (1997): «La previsió i gestió d'emergències». En *Les inundacions*, páginas 89-105. Diputació de Barcelona. Quaderns d'Ecologia Aplicada, núm. 14, Barcelona.
- UPC. Departament d'Enginyeria Hidràulica, M. i A. Martín Vide, J.P. y col. (2003): «Estudi de la dinàmica fluvial de la illa del Ter a Girona». Para Inypsa y la Agència Catalana de l'Aigua. Abril 2003.

AGRADECIMIENTOS

A Gerardo Benito Ferrández, Carmen Llasat Botija, Mariano Barriendos Vallvé, Robert Mas i Santana, Joan Sánchez Anguita, Diego Marín Sánchez y Lorenzo Correa Lloreda.

