

RECUPERACIÓN DEL RÉGIMEN HIDRÁULICO E HIDROLÓGICO DEL ARROYO DEL PARTIDO EN EL TRAMO ANTERIOR A SU AFLUENCIA EN LA MARISMA DE EL ROCÍO (PARQUE NACIONAL DE DOÑANA)

JUAN ÁNGEL MINTEGUI AGUIRRE¹, JOSÉ CARLOS ROBREDO SÁNCHEZ¹,
CARLOS DE GONZALO ARANO¹ Y PABLO HUELIN RUEDA¹

RESUMEN

El artículo expone la metodología de la restauración de un curso torrencial afectado por una alteración antrópica, que fue la causante de que las precipitaciones torrenciales posteriores modificaran la dinámica de su evolución natural, originando procesos de degradación en el medio por el que discurre. Se trata del arroyo del Partido, un pequeño curso de carácter eminentemente torrencial, que tras su canalización en los 7 Km. anteriores a su afluencia en la marisma de El Rocío en el Parque Nacional Doñana (PND) en 1981, modificó el comportamiento de su corriente durante sus avenidas posteriores, provocando la formación de un nuevo cono de sedimentación sobre la marisma, alterando con ello la morfología y dinámica de la misma.

Se hizo necesario tomar medidas para contener el avance de dicho cono sobre la marisma y lograr que el inicio de su formación se retraiga a una superficie anterior a ella. En el verano de 2006 se realizaron las obras de reconstrucción del tramo alterado del arroyo, mediante un sistema hidráulico constituido por dos diques de frenado y desviado de las avenidas torrenciales y la adopción de una amplia superficie de inundación entre ambos, donde las avenidas se expansionen, se laminan y descarguen una gran parte de los sedimentos que transportan; en síntesis, se propicien las condiciones para la formación de un cono de sedimentación en un paraje cercano al que se situaba en 1981.

Se analiza el seguimiento de las actuaciones realizadas en los años hidrológicos 2007-08 y 2008-09, para comprobar la adecuación de las mismas ante los eventos torrenciales que tienen lugar en el paraje donde se ubican y verificar los objetivos previstos con la restauración. Dicho seguimiento ha puesto de manifiesto la necesidad de rectificaciones en la planificación inicial, lo que es habitual cuando se trabaja en cursos torrenciales, para conseguir que el arroyo del Partido adecue su funcionamiento definitivo al régimen hidrológico y al sistema ecológico que disponía antes de su encauzamiento.

Palabras clave: eventos torrenciales; defensa ante avenidas; corrección hidrológica; restauración ecológica.

¹ Unidad de Hidráulica e Hidrología - Departamento de Ingeniería Forestal - Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes - Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n 28040 MADRID.
e-mail: juanangel.mintegui@upm.es

SUMMARY

The article presents the methodology of the restoration of a torrential course affected by a human alteration, which was the cause of afterward modifications in the dynamic of its natural evolution. This started degradation in the environment where it flows. It is the Arroyo del Partido, a small torrential stream that was channelized in 1981 in its last reach of 7 km upstream it gets into the El Rocío marsh in the Doñana National Park. This altered the behavior of flows during following floods, causing a new alluvial fan over the El Rocío marsh, modifying with it the morphology and dynamic.

It was necessary to take measures in order to contain the advance of the fan into the marsh and to achieve that the start of its formation goes up to a surface well upstream the marsh. In summer 2006, reconstruction works were made on the altered reach with and hydraulic system made up by two slowing and diverting check dams for torrential flood and the establishment of a wide flooding surface between them. In this surface the floods expand, laminate and unload a great part of the sediments that transport. In short, to favor the conditions for the creation of a sedimentation fan close the one existing in 1981.

It is analyzed the monitoring of the works made in the hydrologic years 2007-08 and 2008-09 in order to check the adjustment of works in torrential events that take place in their environment, and to verify the aims thought for the restoration. This monitoring has expressed the need of rectifications in the initial plan, which is normal working with torrential courses, to obtain that the Arroyo del Partido adapts its final behavior to the hydrologic regime and to the ecologic system that it had before the channelization.

Keywords: Major events; flood protection; hydrological correction; ecological restoration.

INTRODUCCIÓN

Un curso torrencial es aquel en el que, ante la ocurrencia en su cuenca vertiente de eventos torrenciales (en el caso que nos ocupa, aguaceiros), aparece de manera súbita una descarga líquida y sólida importante, es decir, una crecida o avenida con un caudal sólido significativo incorporado a su corriente, causando con ello el fenómeno conocido en castellano como geo-dinamismo torrencial. Potencialmente en un curso torrencial existen cuatro partes: 1) área o cuenca de alimentación, 2) garganta, 3) cono de sedimentación y 4) canal de desagüe; aunque las dos últimas pueden no presentarse.

Originariamente el arroyo del Partido presentaba sus cuatro partes y sus avenidas se expandían antes de llegar a la marisma del Parque Nacional de Doñana (PND), generando una

serie de ramificaciones o rebosaderos de escaso calado, sin capacidad para provocar tensiones de tracción que pudieran vencer la resistencia a iniciar el movimiento de las arenas que conformaban sus lechos, e incluso favoreciendo el depósito de los sedimentos que arrastraba la corriente, generándose de este modo el primitivo cono de sedimentación. Transcurridas las avenidas, el flujo, laminado y desprovisto de sedimentos, se concentraba en varios canales de desagüe de dicho cono de sedimentación, descargando a la marisma en régimen uniforme. Los terrenos de este cono sólo se cultivaban en los años en los que las avenidas del invierno anterior lo inundaban, manteniéndose los restantes años como erial o pastos. El Plan Almonte-Marismas puso en cultivo esta superficie en 1981, para lo que se encauzó el arroyo del Partido en sus últimos 7 kilómetros anteriores a su afluencia en la marisma.

La canalización modificó de forma sustancial la circulación de los flujos en los momentos de avenidas forzando a su concentración; de este modo el primitivo cono de sedimentación del arroyo pasó a comportarse como una prolongación de su garganta y, al descargar finalmente las avenidas en la marisma, terminaron generando en ésta un nuevo cono de sedimentación; a causa de la expansión de la corriente y el consiguiente depósito de la carga sólida que hasta entonces llevaban incorporada. Estudiando la expansión del nuevo cono de sedimentación sobre fotografías aéreas de diferentes fechas (delimitación de la superficie del nuevo cono en las mismas y traslado de dicha información a un SIG para su correcta identificación, ubicación y medición), junto con dos campañas de trabajos topográficos de campo, la primera realizada entre 1997-99 y la segunda en 2003, para la determinación de las coordenadas altimétricas; se estimaron los incrementos en superficie y volumen del nuevo cono de sedimentación dentro de la marisma del PND en el periodo analizado (Tabla 1).

Ante esta situación y tras su análisis, se propusieron las siguientes acciones para tratar de recuperar el régimen hidrológico primitivo del

arroyo del Partido: 1) Construir en una sección del arroyo, situada al inicio de su primitivo cono de sedimentación, a unos 6 Km. de su afluencia a la marisma del PND, un dique de cierre para controlar la erosión remontante aguas arriba del mismo; 2) Permitir expansionarse a la corriente del arroyo del Partido durante las avenidas, a partir de la sección donde se ubica el dique anterior y aguas abajo del mismo; para recuperar parte de su antigua llanura de inundación. Por razones técnicas y socio-económicas, se dispuso que la superficie proyectada para inundación-laminación-sedimentación se estableciera en el margen izquierdo de la canalización, aguas abajo del dique en cuestión.

En el proyecto definitivo el área destinada a expansión de la corriente aguas abajo del dique se protegió en algunas zonas de su perímetro por muros y, además, dado que la misma presenta una pendiente hacia otro arroyo menor, llamado Cañada del Pinar, se construyó sobre éste otro dique, para regular las avenidas y retornar el flujo sobrante de la regulación hacia el área destinada a inundación-laminación. El proyecto se ejecutó en el verano de 2006 y constituye la Actuación núm. 3 de otro proyecto mayor destinado a la Regeneración Hídrica de la Marisma del PND conocido como Proyecto DOÑANA 2005 que, debido a su importancia y a su impacto medioambiental, dispuso desde su inicio de una Comisión Ejecutiva y otra Comisión Científica para su Seguimiento. Lo que se expone a continuación son fundamentalmente los trabajos de Seguimiento de la Actuación núm. 3.

OBJETIVOS

El objetivo del proyecto de restauración del tramo final del arroyo del Partido es la regeneración hidráulica e hidrológica de los siete Km. anteriores a su afluencia en la marisma de El Rocío en el PND.

El primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido condicionaba a las avenidas de este arroyo a expansionarse y con ello antes de al-

Año	Superficie (m ²)	Volumen (m ³)
1956	0	0
1982	152.241	5.338
1985	292.142	19.657
1993	1.042.800	250.460
1996	2.035.211	954.017
1997	3.325.798	2.547.588
1998	3.814.778	3.733.575
2000	3.929.143	3.899.220
2001	3.979.757	3.973.527
2002	4.195.430	4.297.024
2003	4.314.186	4.479.898

Tabla 1. Estimación de los incrementos en superficie y volumen del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido sobre la marisma del PND entre 1956-2003.

Table 1. Estimation of the surface and volume increase of the new sedimentary fan of the Partido stream over the Doñana National Park marsh between 1956 and 2003.

canzar la marisma sus flujos experimentaban los procesos siguientes: *a)* una pérdida de carga, *b)* su laminación y *c)* el depósito de una gran parte de los materiales que transportaban hasta el lugar. Con el proyecto de restauración del tramo final del arroyo del Partido (en adelante con la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005) se pretenden conseguir los mismos efectos. Ello obliga en primer lugar a establecer un Sistema de Control de las futuras Avenidas que tengan lugar en el arroyo del Partido; como paso previo para regular la corriente que finalmente afluye en la marisma en tales situaciones y, consecuentemente, implica la necesidad de establecer una nueva superficie de inundación-laminación-sedimentación en el área que con anterioridad a 1981 se extendía el primitivo cono de sedimentación del citado arroyo, o al menos en una parte de la misma.

Definida dicha superficie y asegurado que la misma cumple con las funciones de inundación-laminación-sedimentación; el tramo final del arroyo del Partido entra en su fase de restauración; porque se detiene el crecimiento del cono de sedimentación generado en la marisma del PND; se inicia la formación de un nuevo cono en el área destinada a tal fin y es posible recomponer los antiguos canales de desagüe, para que el flujo de las avenidas del arroyo del Partido descargue en la marisma en régimen uniforme, tras ser laminado y desprovisto de su caudal sólido en el área destinada al efecto con la Actuación núm. 3.

METODOLOGÍA

El comportamiento de los cursos torrenciales es aleatorio, al ser aleatorios los principales factores que lo condicionan; por ello todo proyecto de restauración de los mismos debe asumir un Seguimiento y plantearse tanto a corto como a largo plazo.

Para ello se requiere establecer una situación de partida del área objeto del Seguimiento, que en el caso que nos ocupa, se optó por la que ésta presentaba en julio de 2003, cuando finalizaron los trabajos topográficos efectuados sobre el te-

reno, previos a la ejecución de las obras de la Actuación núm. 3. En dicha fecha se disponía de una información completa topográfica y temática del área en cuestión y del comportamiento geo-torrencial del arroyo del Partido en ella durante el periodo 1995-2003 (avenidas ocurridas; sus caudales; la emisión por éstos de sedimentos a la marisma, tanto en suspensión como en carga de fondo, y el avance del nuevo cono de sedimentación en la marisma (Tabla 1). El seguimiento a largo plazo implica una investigación, que establezca un nivel de información semejante del área afectada, pasado un periodo lo suficiente largo desde la ejecución en 2006 de las obras de la Actuación núm. 3; mientras que el seguimiento a corto plazo recomienda seguir el comportamiento de las obras ante las avenidas que ocurran en el arroyo del Partido a partir de su ejecución; para detectar sus posibles desviaciones funcionales respecto de lo previsto inicialmente en el proyecto y proponer las rectificaciones pertinentes al diseño inicial, a fin de adecuarlo a la dinámica geo-torrencial del curso a corregir, en consonancia con los objetivos previos adoptados en el proyecto. A continuación se refiere a este último y se exponen los trabajos de Seguimiento llevados a cabo en el periodo 2007-09.

En el arroyo del Partido se ha seguido la norma general que se aplica en los cursos torrenciales, atender en primer lugar y a corto plazo los aspectos hidráulicos, que son los que permiten un control más definido de las futuras avenidas que acontezcan en el mismo; mientras que a largo plazo, dado que lo que se pretende es asemejar el régimen hidrológico del paraje en cuestión a la situación que presentaba antes del encauzamiento del arroyo en 1981, los aspectos hidrológicos van adquiriendo el protagonismo.

RESULTADOS: OBRAS EJECUTADAS Y MEDIDAS ADOPTADAS CON LA ACTUACIÓN NÚM 3 DEL PROYECTO DOÑANA 2005

A corto plazo el plan restaurador diseñado para el arroyo del Partido se identifica con el Sistema

de Control de sus futuras Avenidas. Con este objetivo se realizaron las obras pertinentes y se destinó al servicio del proyecto las superficies necesarias. En esencia, éstas operaciones son las siguientes: *a*) un dique construido sobre el propio arroyo del Partido al inicio de su primitivo cono de sedimentación (en adelante DIQUE 1), que además de controlar la erosión remontante aguas arriba del mismo, actúe como elemento director del esquema restaurador del arroyo del Partido, es decir, de la Actuación núm. 3; *b*) un segundo dique construido sobre el arroyo de la Cañada del Pinar antes mencionado (en adelante DIQUE 2) y *c*) un espacio disponible para inundación-laminación-sedimentación ubicado entre ambos arroyos y planificado en la Actuación núm. 3 con este propósito. La comprensión del esquema obliga a extenderse en algunos detalles del comportamiento del arroyo del Partido en el paraje objeto de la reconstrucción, que se aborda a continuación.

En el pasado anterior al encauzamiento del arroyo del Partido (1981), éste iniciaba su primitivo cono de sedimentación en el entorno donde se ha construido el DIQUE 1 (2006). A partir de dicha sección el flujo de las avenidas que tenían lugar en el arroyo se expandía por una gran superficie divagando por ella; pero siempre se mantenía un pequeño canal principal en el que, pasado el efecto de las avenidas, se concentrara una parte de la corriente, que descargaba a la marisma laminada y desprovista de sedimentos, bordeando el límite oriental de la aldea de El Rocío. Este pequeño canal principal era realmente el genuino canal de desagüe del cono de sedimentación del arroyo del Partido, recibía el nombre de caño Ajolí y tenía una sección de evacuación máxima de unos $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; conviene mencionar que no era el único canal de desagüe del cono, pero sí el más representativo. Tras la canalización del tramo final del arroyo del Partido, las avenidas ocurridas entre 1982-2003 aterraron por completo el caño Ajolí, al tiempo que formaron en la marisma de El Rocío su nuevo (actual) cono de sedimentación.

Al este de la superficie objeto de restauración circula el arroyo de la Cañada del Pinar, que tiene su propia cuenca, aunque en determi-

nadas avenidas del arroyo del Partido los caudales de éste puedan invadir el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar en el paraje donde se iniciaba la formación del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido. Dicha zona se corresponde con el vértice superior de la superficie triangular que aparece en la fotografía de la Figura 1. En la

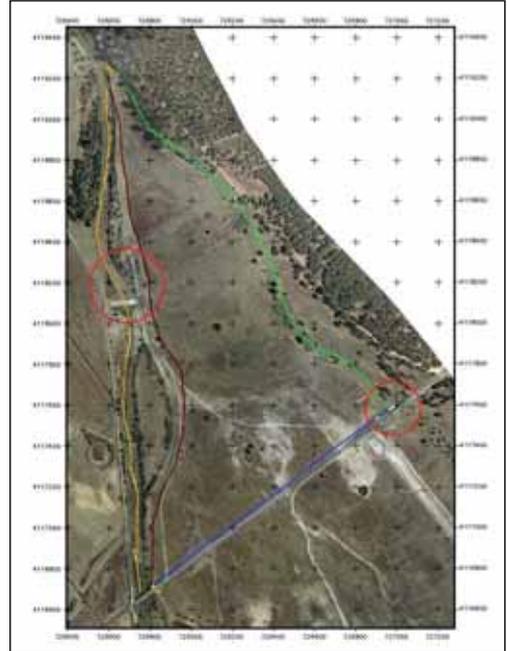


Figura 1. Superficie de inundación-laminación-sedimentación de la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005 sobre una fotografía aérea de 2008 que muestra: *a*) el arroyo del Partido (naranja); *b*) su muro del margen izquierdo en 2003 (marrón); *c*) el arroyo de la Cañada del Pinar (verde); *d*) el camino del El Rocío a Villamanrique de la Condesa (azul); *e*) la ubicación de los DIQUES 1 y 2 (círculos rojos); *f*) los clavos topográficos J10, J30 y J33 (triángulos amarillos) y *g*) el paraje donde los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar se aproximan, pudiéndose intercambiar sus flujos en caso de avenidas (dos triángulos amarillos en el extremo superior de la imagen).

Figure 1. Flood-lamination-sedimentation surface established in the Intervention number 3 of the DOÑANA 2005 Project, drawn on a photograph taken in 2008, that shows: *a*) the Partido stream (orange); *b*) its left bank wall in 2003 (brown); *c*) The Cañada del Pinar stream (green); *d*) asphalted road that connects El Rocío and Villamanrique de la Condesa (blue); *e*) CHECK DAM 1 and 2 (red circles); *f*) topographical nails J10, J30 and J33 (yellow triangles); *g*) the spot where the Partido stream and Cañada del Pinar stream approach, being possible an exchange of flows in case of flood (two yellow triangles on the top of the image).

misma el curso que drena por la izquierda y que está señalado con una traza naranja es el arroyo del Partido; el que circula por la derecha, señalado con una traza verde, es el arroyo de la Cañada del Pinar y en la parte inferior de la fotografía se muestra, en azul, el trazado de un camino asfaltado de oeste a este, que une las poblaciones de El Rocío y Villamanrique de la Condesa. La superficie comprendida entre ambos arroyos era parte del antiguo cono de sedimentación del arroyo del Partido hasta su canalización en 1981 y con la Actuación núm. 3 se pretende recuperarlo nuevamente para tal fin. En la misma Figura 1 se muestran también los DIQUES 1 y 2 en sus respectivos emplazamientos y un triángulo amarillo en el extremo inferior izquierdo de la fotografía, que corresponde a un clavo topográfico J10, instalado en un proyecto anterior y de coordenadas conocidas, que se ha utilizado de referencia en todas las operaciones topográficas del presente proyecto de Seguimiento; a partir de él por nivelación se han establecido los clavos topográficos J30 (en el dique construido en el arroyo del Partido) y J33 (en el extremo oeste del puente del mencionado camino asfaltado sobre el arroyo de la Cañada del Pinar).

Dicha superficie tiene su pendiente dirigida hacia el arroyo de la Cañada del Pinar; razón por la que este arroyo se comportaba en el pasado como un desagadero adicional de las inundaciones causadas por las avenidas del arroyo del Partido en el área que se comenta. También se señala que la superficie del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido se extendía a derecha e izquierda de la canalización de 1981, pero el plan restaurador de la Actuación núm. 3 limita la superficie de inundación a su margen izquierdo por cuestiones socio-económicas; lo que exige una mayor atención en el diseño de las actuaciones iniciales y en los posteriores trabajos de rectificación establecidos a través del Seguimiento. A continuación se describen específicamente los DIQUES 1 y 2 y la superficie de inundación-laminación-sedimentación establecida con la Actuación núm. 3.

a) DIQUE 1, construido en el arroyo del Partido

Está constituido por un azud transversal al cauce de 2,6 m de altura sobre el lecho actual del arroyo. Inicialmente sobre él se estableció un vertedero con una base de 70 m de longitud y 2 m de anchura en coronación, situado a una cota media de 16,7 m. El vertedero tiene una altura de 2 m. El paramento del azud estaba atravesado por 31 mechinales circulares de 0,3 m de diámetro, para drenar el volumen embalsado por la obra, dispuestos en dos filas de 15 y uno de fondo (Figura 2, fotografías superiores y Figura 3, alzado del DIQUE 1 en el año 2006).

Agua arriba de la estructura, sobre el margen izquierdo del cauce, se sitúa un vertedero lateral de 140 m de longitud, establecido sobre el propio margen de arena y revestido con escollera y una capa de hormigón ciclópeo, para evitar erosiones en el momento de vertido hacia la llanura de inundación-laminación-sedimentación, situada tras el citado margen. Su cota oscila algo, debido a su longitud y rusticidad, entre los valores 16,60 y 16,77 m. (Figura 2, fotografías inferiores y Figura 4, vista del DIQUE 1 en planta).

El DIQUE 1 constituye el eje central del sistema corrector y ha sido objeto de un Seguimiento especial. Con su construcción se inicia el control de la erosión remontante en el lecho del arroyo del Partido aguas arriba de su paramento superior, cumpliéndose uno de los objetivos que condicionaron su ejecución. El otro objetivo del DIQUE 1, quizá el más importante, es conseguir que una parte del caudal de avenida que llega hasta su paramento aguas arriba, se desvíe hacia el área de inundación-laminación-sedimentación proyectada en la Actuación núm. 3 (Figura 1) y se expanda por ella. Para ello se le ha dotado al dique de dos vertederos: el frontal (señalado en rojo en la Figura 4) que vierte directamente al cauce del arroyo del Partido y el lateral (señalado en azul en la Figura 4), que desvía el caudal restante hacia el área de inundación-sedimentación. El diseño de su vertedero frontal es especialmente



Figura 2. DIQUE 1 construido en el arroyo del Partido al inicio de su antiguo cono de sedimentación, que constituye el elemento director del esquema restaurador de la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005. Fotografías superiores: vertedero frontal, con el perfil original de 2006, visto desde aguas arriba (izquierda) y desde aguas abajo (derecha). Fotografías inferiores: Vertedero lateral del dique, detalle (izquierda) y panorámica desde aguas arriba (al fondo de la imagen derecha).

Figure 2. CHECK DAM 1 built in the upper part of the original sedimentary fan of the Partido stream. It is the director element of the restorer outline in the Intervention number 3 of the DOÑANA 2005 Project. Upper photographs: frontal spillway with the original section in 2006 seen from upstream (left) and downstream (right). Bottom photographs: check dam's lateral spillway, detail (left) and pan from upstream (at the back right).

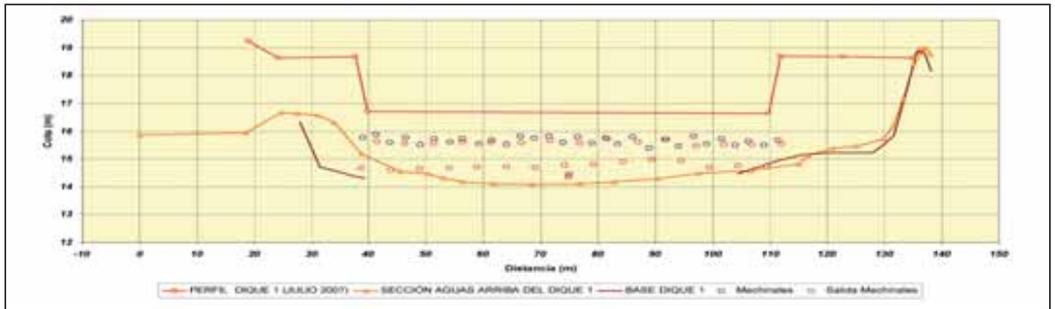


Figura 3. Alzado del DIQUE 1 construido en el arroyo del Partido (2006) visto desde aguas arriba (rojo). También se representan: a) el perfil de una sección transversal al cauce levantado aguas arriba del dique (naranja), cuyo margen izquierdo establece la cota del vertedero lateral del dique; b) el nivel del terreno o de la sedimentación en 2007 en la base del paramento aguas arriba del dique (marrón). Respecto a los mechinales: los círculos azules corresponden a entradas de flujo y los círculos rojos a salidas de flujo.

Figure 3. CHECK DAM 1 built over the Partido stream represented in front elevation (2006) and seen from downstream (in red). Also are represented: a) a cross section profile upstream of the check dam (orange), which sets the left margin of the spillway side elevation of the check dam; b) ground level or sedimentation level in 2007 on the base of the check dam's upstream face (brown). Regarding the weep holes, the blue circles indicate the inflow and red circles indicate their outflow.



Figura 4. Vista en planta del DIQUE 1 sobre una fotografía aérea de agosto de 2008 en la que aparecen: *a)* puntos del terreno obtenidos con levantamientos topográficos utilizando una estación total (azules) en 2007 y un DGPS (verdes) en 2008; *b)* la línea roja que define la posición del vertedero frontal; *c)* la línea azul que establece el vertedero lateral; *d)* la curva marrón que representa el perfil del terreno en el área de inundación-sedimentación, inmediatamente aguas abajo del vertedero lateral; *e)* la línea naranja que define un perfil levantado al cauce aguas arriba del dique; *f)* la línea en verde oscuro que representa a la nueva mota construida en el margen izquierdo del arroyo del Partido, aguas abajo del dique, para separar la superficie de inundación-sedimentación de la del cauce del arroyo.

Figure 4. Plan-form of the CHECK DAM 1 in a photograph of August 2008. Drawn on the picture: *a)* points recorded in different topographical surveys using total station in 2007 (blue) and a DGPS in 2008 (green); *b)* the red line defines the frontal spillway; *c)* the blue line defines the lateral spillway; *d)* the brown line represents the ground profile in the flood-sedimentation area immediately downstream the lateral spillway; *e)* the orange line establishes the profile of a cross section surveyed upstream the check dam; *f)* the dark green line represents the new sand wall direction, which was built over the left bank of the Partido stream and downstream the check dam in order to divide the flood-sedimentation surface from the Partido stream course.

importante, pues regula el caudal que pasa directamente al cauce del arroyo del Partido, que es el que condiciona: *a)* la detención o no del nuevo cono de sedimentación formado sobre la marisma de El Rocío y *b)* la existencia o no de problemas por inundaciones y sedimentacio-

nes al este de la aldea de El Rocío. En el diseño del vertedero lateral se tuvo una especial preocupación por el previsible comportamiento del terreno en el área de inundación-laminación-sedimentación, tras recibir éste la corriente de las avenidas a través del mismo. Esta precau-

pación se analiza posteriormente investigando el comportamiento del sistema corrector del DIQUE 1 ante determinadas avenidas acacidas en el arroyo del Partido tras su ejecución y posterior rectificación (2009).

b) DIQUE 2, situado en el arroyo de la Cañada del Pinar, aguas arriba del puente sobre el mismo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa

El DIQUE 2 (Figuras 5 y 6) sirve de elemento regulador del nivel de inundación en la superficie destinada a tal fin y para que sólo una parte del flujo de avenida que entra en el área

de inundación-laminación-sedimentación, procedente del vertedero lateral del DIQUE 1, descargue directamente al arroyo de la Cañada del Pinar, forzando al resto de la masa líquida a almacenarse aguas arriba del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, e incluso a verter por encima del mismo si el nivel de almacenamiento lo obliga. Se construyó en 2006 en el cauce del citado arroyo, inmediatamente aguas arriba del puente sobre el mismo del mencionado camino asfaltado.

El DIQUE 2 está constituido por un azud transversal al cauce de 1,5 m de altura. Sobre él se ubica un vertedero de 29,5 m de longitud



Figura 5. DIQUE 2. Fotografías superiores: Vistas del dique construido en el arroyo de la Cañada del Pinar, inmediatamente aguas arriba del puente sobre el mismo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique. Fotografías inferiores: A la izquierda detalle de los muros laterales de hormigón que conforman el vertedero del dique. A la derecha la prolongación del muro de hormigón por otro de tierra, para encauzar la corriente hacia el mismo y evitar que se pueda desviar hacia el paso de fauna situado por debajo de la carretera.

Figure 5. CHECK DAM 2. Top photographs: view of the check dam built over the Cañada del Pinar stream, immediately upstream from the bridge of the asphalted road between El Rocío and Villamanrique. Bottom photographs: On the left, detail of the concrete lateral wall which shape the check dam's spillway. On the right, the extension of the concrete wall is made by a sand wall to avoid an occasional change of the stream course towards the fauna pass, placed under the road.

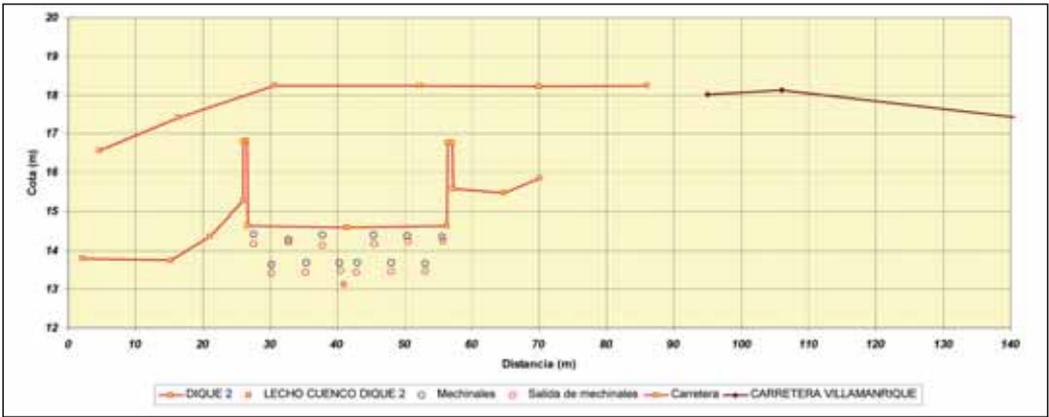


Figura 6. Alzado del DIQUE 2 in front elevation seen from downstream (in red). También se representan: a) el lecho del arroyo (cuadrado amarillo); b) el puente sobre el arroyo (en rojo); c) el camino asfaltado (en marrón). En relación con los mechinales: los círculos azules corresponden a entradas de flujo y los círculos rojos a las salidas.

Figure 6. CHECK DAM 2 in front elevation seen from downstream (in red). It's represented as well: a) the stream bed (yellow square); b) the bridge over the stream (in red); c) the asphalted road (in brown). Regarding the weep holes: blue circles indicate the inflow and red circles indicate their outflow.

y 3 m de anchura en coronación, situado a una cota media de 14,62 m. Aguas arriba de la estructura, sobre el margen izquierdo del cauce, existe un muro lateral de tierra de 15,70 m de cota, que dirige el flujo hacia el vertedero del dique y evita que el agua se desvíe hacia el paso de fauna que se encuentra por debajo de la carretera a la izquierda de la obra. El paramento del azud está atravesado por 12 mechinales de 0,3 m de diámetro que drenan el volumen embalsado por la obra, dispuestos en dos filas de 6.

Con el DIQUE 2 se estabiliza el calado de la inundación en el área destinada al efecto; contribuyendo con ello a que la corriente se desplace aguas abajo sin experimentar desviaciones masivas hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y, además, contribuye a que la corriente aguas arriba del dique se mantenga en régimen lento.

c) Espacio disponible para inundación-laminación-sedimentación planificado con la Actuación núm. 3

Se trata de una superficie que está disponible para inundarse en situaciones de avenidas en

el arroyo del Partido, proyectada en la Actuación núm. 3 aguas abajo del DIQUE 1 para tal fin (Figura 1). Su objetivo es permitir que la corriente experimente durante las avenidas los mismos procesos de expansión, inundación, laminación y sedimentación que lo hacía en el pasado anterior al encauzamiento del arroyo, antes de afluir laminada y desprovista de sedimentos a la marisma; por tanto, constituye un elemento esencial en el proyecto.

El previsible comportamiento geomorfológico de la solera de esta superficie de inundación, ante el paso por ella de los caudales de avenida descargados a la misma través del vertedero lateral del DIQUE 1, en dirección al arroyo de la Cañada del Pinar siguiendo el gradiente del terreno en el lugar, representó una de las preocupaciones más serias del proyecto; ante la posibilidad de que pudiera producirse un desplazamiento masivo de la corriente; lo que llegó a condicionar su redacción.

Como tal comportamiento no era posible conocerlo a priori; en el esquema inicial del proyecto se optó por una solución conserva-

dora. Se estableció el reparto de los caudales entre los dos vertederos del DIQUE 1 con criterios de ingeniería hidráulica y de prudencia respecto a la evolución previsible del terreno en el área de inundación-laminación. En este contexto, se consideró como caudal de proyecto la avenida de periodo de recurrencia de 100 años en el paramento aguas arriba del dique, que se estimó en $358 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; adecuando el siguiente reparto para situaciones extraordinarias: $144 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (el 40% del caudal total) descargarían directamente por el vertedero frontal y por los mechinales del dique y el flujo restante $214 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ lo harían por el vertedero lateral hacia el área de inundación-laminación establecida en la Actuación núm. 3.

La Figura 1 muestra la superficie de inundación-laminación-sedimentación situada inmediatamente aguas abajo del vertedero lateral del DIQUE 1 y aguas arriba el camino asfaltado que une El Rocío con Villamanrique de la Condesa, tiene 57 ha y forma triangular. Resulta especialmente significativo para el control de la lámina de inundación en esta área, conocer las cotas de sus vértices. En el caso de los dos vértices inferiores el 19-07-2003 se llevó a cabo una nivelación geométrica sobre el terreno previamente inundable, situado aguas arriba del mencionado camino asfaltado pero muy próximo a él y partiendo del punto de cota conocida J10. Con dicha nivelación se enlazó la cota del lecho del arroyo del Partido, aguas arriba del puente sobre el citado camino asfaltado, con la cota del lecho del arroyo de la Cañada del Pinar inmediatamente aguas arriba del camino asfaltado en cuestión, su resultado se muestra en la Figura 7.a. Por su parte, la Figura 7.b representa las cotas de los lechos del arroyo del Partido y del arroyo de la Cañada del Pinar en los itinerarios recorridos por cada uno de ellos en el área en cuestión; así como el umbral que debía superar en dicha fecha la corriente del arroyo del Partido, para desbordar el primitivo muro de la margen izquierda de su encauzamiento y alcanzar al área de inundación-sedimentación. En la Fi-

gura 7.a se observa que la pendiente de la superficie que se comenta se dirige hacia el arroyo de la Cañada del Pinar, lo que justifica la construcción sobre éste del DIQUE 2, inmediatamente aguas arriba del referido camino, para que la lámina de inundación se mantuviera en régimen lento aguas arriba de su paramento superior; así como que la cota del lecho de ambos arroyos es prácticamente la misma.

El esquema de la Figura 8, que también se apoya en la fotografía aérea de 2008, detalla el Sistema de Control para las futuras Avenidas del arroyo del Partido. En él, además de los elementos comentados en la Figura 1, se muestra en su extremo inferior izquierdo la ubicación del antiguo aforador de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir núm. 151 (en rojo) situado sobre el arroyo del Partido (en gris), el itinerario de la nivelación geométrica definida en la Figura 7.a (en azul) y el de una nueva nivelación geométrica realizada el 18-10-2008 de todo el camino asfaltado, en esta ocasión apoyado sobre su solera de asfalto, en el intervalo comprendido entre el arroyo de la Cañada del Pinar y el arroyo del Partido; concretamente entre los clavos topográficos J33-J10-J33 (ida y vuelta) situados en sus extremos (en marrón).

Asimismo, en el vértice superior de la figura, donde los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar se encuentran más próximos y existe la posibilidad, en caso de avenidas en el arroyo del Partido, que su corriente invada el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar; se muestra (con puntos verdes claros) la ubicación donde se llevaron a cabo levantamientos topográficos en octubre de 2008, para precisar el perfil transversal del arroyo de la Cañada del Pinar en ese lugar y su referencia (para establecer el desnivel) respecto de la curva de remanso del arroyo del Partido causado por la presencia del DIQUE 1 en situaciones de avenidas. Dichas secciones del arroyo de la Cañada del Pinar se propusieron protegerlas con escollera, para evitar una erosión de fondo del lecho.

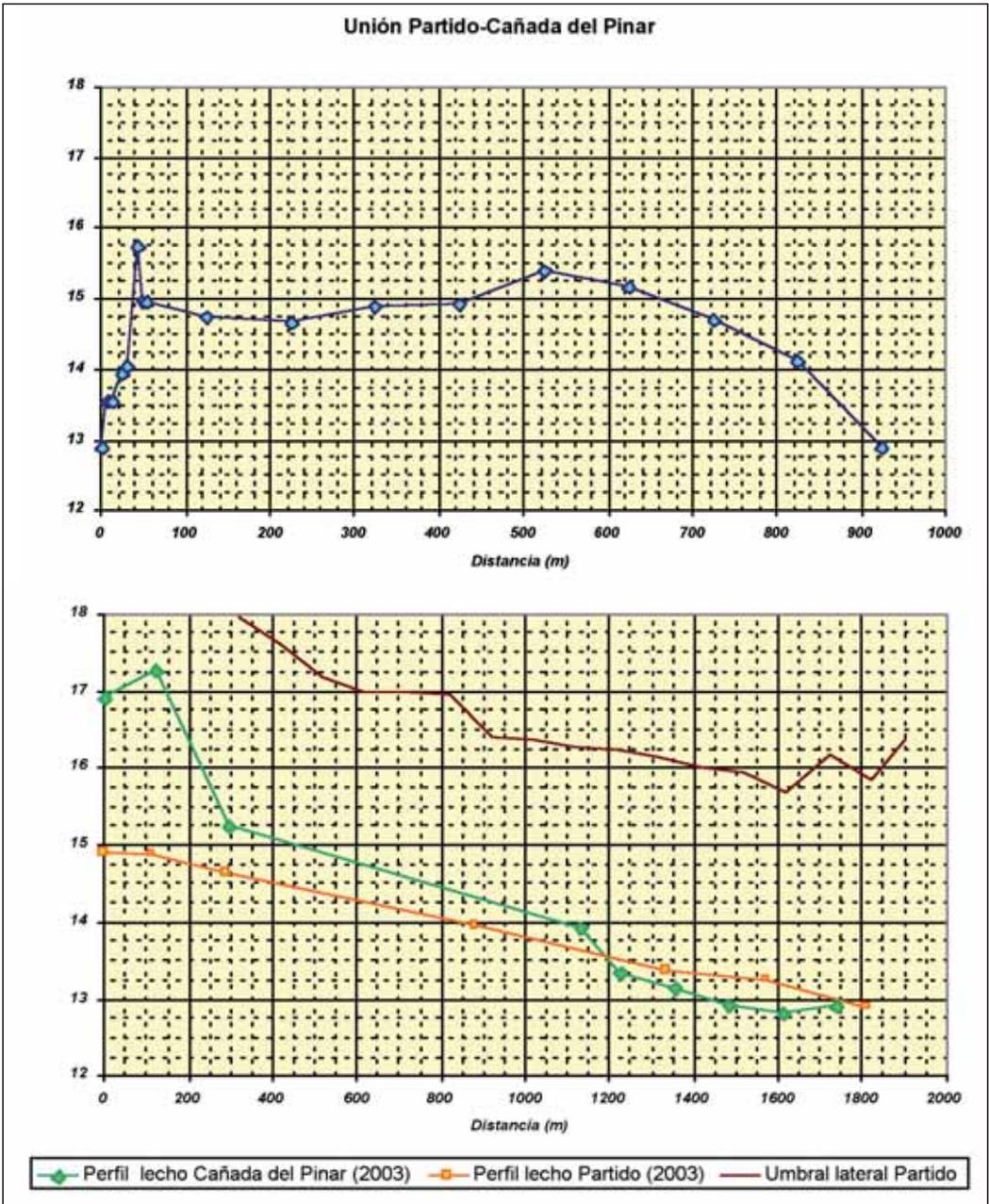


Figura 7. a) Esquema superior: Nivelación geométrica entre los lechos del arroyo del Partido y del arroyo de la Cañada del Pinar (19-07-2003), en la dirección del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, pero apoyado sobre el terreno inundable y no sobre el camino; **b)** Esquema inferior: Cotas de los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar en el área estudiada y el umbral a superar por la corriente del arroyo del Partido para desbordar al área de inundación-sedimentación en 2003.

Figure 7. a) Upper diagram: Geometric levelling over the field (not the road) following the asphalted road direction between the courses of Partido and Cañada del Pinar streams (July 19th 2003); **b)** Bottom diagram: elevation of the Partido and Cañada del Pinar streams in the studied area together with the threshold to be overcome by the Partido stream flow to flood the sedimentation area in 2003.

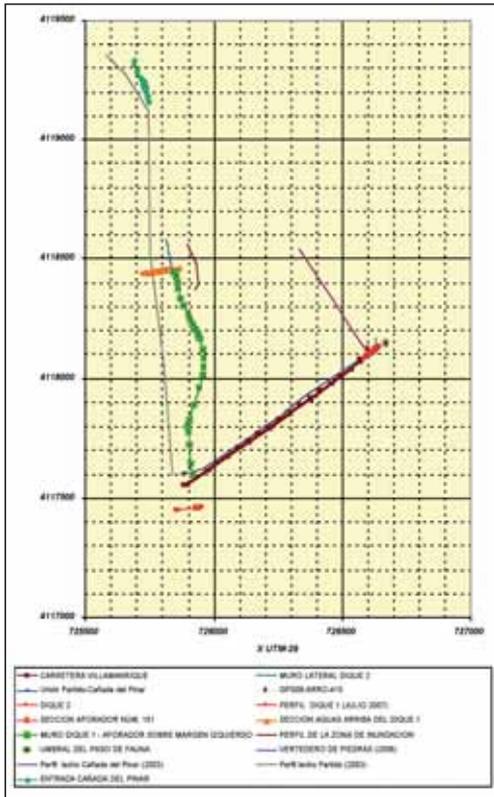


Figura 8. Representación del Sistema de Control para las futuras Avenidas del arroyo del Partido en el área de inundación situada entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar, aguas arriba del camino-umbral de vertido que une El Rocío con Villamanrique de la Condesa. En la misma, además de los elementos definidos en la Figura 1, se detallan: a) las nivelaciones geométricas efectuadas el 18-10-2008 (marrón) y el 17-07-2003 (azul) en la zona inferior de la imagen; b) el aforador núm. 151 de la CHG (en rojo) en el extremo inferior izquierdo; c) las secciones del cauce del arroyo de la Cañada del Pinar que, en el caso de avenidas en el arroyo del Partido pueden recibir caudales trasvasados de éste último, que se levantaron topográficamente (verde), en la zona superior del esquema.

Figure 8. Representation of the Control System for future Partido stream floods in the flood area placed between the Partido and Cañada del Pinar streams, upstream the road-spill threshold that connects El Rocío with Villamanrique. Completing Figure 1 it is detailed: a) the geometric levelling made in October 18th 2008 (in brown) and July 17th 2003 (in blue); b) on the bottom left vertex is shown the flow gauge number 151 check dam of the CHG (red); c) on the top, cross section of the Cañada del Pinar stream that can receive flow from the Partido stream in case of flood (green).

En el gráfico de la izquierda de la Figura 9 se observa que la superficie de inundación-laminación-sedimentación no termina en el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, sino que en situaciones de avenidas importantes en el arroyo del Partido (periodos de retorno > 100 años) éste puede convertirse en un umbral de vertido del agua almacenada aguas arriba del mismo (geográficamente al norte) hacia la llanura de inundación situada



Figura 9. izquierda: Superficie de inundación-laminación-sedimentación (227 ha.) ubicada aguas abajo del umbral de vertido del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, en el tramo comprendido entre el puente sobre el arroyo del Partido hasta el puente sobre el arroyo de la Cañada del Pinar. Derecha: Camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa en el tramo mencionado, que puede convertirse en umbral de vertido del volumen de agua almacenado aguas arriba del mismo.

Figure 9. Left: flood-lamination-sedimentation surface (227 ha.) placed downstream the spill threshold determined by the asphalted road from El Rocío to Villamanrique de la Condesa between the bridge over the Partido stream and the one over the Cañada del Pinar Stream. Right: asphalted road from El Rocío to Villamanrique de la Condesa. This stretch can turn into a spill threshold for the volume of stored upstream.

aguas abajo (al sur). Lógicamente los tramos de vertido coinciden con los de menor cota del citado camino asfaltado y dependerán del nivel que alcance la lámina de agua al norte del mismo. En la Actuación núm. 3 se previó esta circunstancia y para establecer con precisión dichos tramos se realizó (18-10-2008) la nivelación geométrica de todo el camino asfaltado sobre el propio asfalto de su solera (en marrón en la Figura 8), que se ha descrito anteriormente. El área de inundación-laminación-sedimentación que continúa aguas abajo del mencionado camino asfaltado ocupa una superficie de 227 ha. (Figura 9) y su pendiente también se dirige hacia el arroyo de la Cañada del Pinar, pero es más suave.

**ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS:
COMPORTAMIENTO DE LAS OBRAS
EJECUTADAS Y DE LAS DISPOSICIONES
ADOPTADAS CON LA ACTUACIÓN
NÚM. 3 EN EL VERANO DE 2006.
RECTIFICACIONES PROPUESTAS Y
EFECTUADAS AL DISEÑO ORIGINAL DE
LAS OBRAS**

Tras concluir las obras y el resto de las disposiciones adoptadas con la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005 en el verano de 2006; al año siguiente se inició su Seguimiento. Las dos primeras operaciones fueron: 1) Situar topográficamente en el territorio escenario del proyecto la ubicación del DIQUE 1; del DIQUE 2 y de los límites de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación. 2) Calcular las Curvas de Gasto en los Sistemas de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecidos con el DIQUE 1 y con el DIQUE 2.

**Posicionamiento de los principales
elementos del Sistema de Control de
Avenidas del arroyo del Partido**

Para esta operación se partió del clavo topográfico J10 de coordenadas conocidas UTM-USO 29-ED50 ($x = 725880,3923$; $y = 4117558,3729$; $z = 16,6798$), que se representa

con un triángulo amarillo en el extremo inferior de la Figura 1. Mediante nivelación topográfica se definió la cota altimétrica del clavo J30, que se instaló en el ala derecha del vertedero frontal del DIQUE 1 ($x = 725740,9004$; $y = 4118436,4820$; $z = 18,6860$), y a través de una nivelación geométrica se determinó la cota altimétrica del clavo J33, que se plantó en el puente del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique a su paso sobre el arroyo de la Cañada del Pinar, inmediatamente aguas abajo del DIQUE 2 ($x = 726565,900$; $y = 4118077,2506$; $z = 18,3218$). A partir del J30 se definieron los restantes puntos representativos situados en el propio DIQUE 1 y en su entorno; mientras que desde el J33 se establecieron los puntos significativos del DIQUE 2 y de sus alrededores. En las operaciones topográficas efectuadas directamente sobre el terreno en la superficie objeto del Seguimiento, las coordenadas planimétricas (x, y) se obtuvieron utilizando un DGPS-Leica; pero las coordenadas altimétricas (z) se determinaron por nivelación en el caso de los clavos topográficos J30 y J33 y de los restantes puntos establecidos con las operaciones del año 2007 (puntos de color azul claro en la Figura 4); en los puntos determinados en el año 2008 (en color verde claro en la Figura 4) las cotas altimétricas correspondientes al elipsoide obtenidas con el DGPS, se ajustaron a las del geoida a partir del mapa de ondulación efectuado para la zona.

**Curvas de Gasto en los elementos del
Sistema de Control de Avenidas del arroyo
del Partido establecidos con el DIQUE 1 y
con el DIQUE 2.**

Tras la ejecución del DIQUE 1 según el planteamiento descrito (2006), se comprobó que el sistema de control establecido evitaba los problemas graves por inundaciones y deposiciones de sedimentos en el entorno oriental de la aldea de El Rocío, ante la ocurrencia de avenidas extraordinarias en el arroyo del Partido; pero no se solucionaba la estabilización del nuevo cono de sedimentación del arroyo instalado en la marisma, ni los problemas de inundaciones menores en el límite este de la aldea

de El Rocío; porque aún llegaban caudales importantes hasta el entorno de dicha aldea incluso en avenidas ordinarias. Se requería, por tanto, realizar algunas rectificaciones al diseño inicial, para conseguir la estabilización definitiva del tramo final del arroyo del Partido anterior a su afluencia en la marisma de El Rocío. La cuestión no supone ninguna novedad tratándose de obras de corrección de cursos torrenciales; que tradicionalmente se plantean a partir de un esquema hidráulico razonado preliminar, acompañado de una actuación de corrección, a la que se le aplican las rectificaciones necesarias posteriormente, a modo de

aproximaciones sucesivas, para adecuar el comportamiento de la actuación inicial ante los futuros fenómenos torrenciales de la zona, hasta conseguir el objetivo del proyecto. Por otra parte, durante las avenidas del arroyo del Partido, no se conseguía la inundación proyectada en el área destinada al efecto con la Actuación núm. 3. Ante estas circunstancias, como paso previo a las operaciones de rectificación en el DIQUE 1, se determinaron las Curvas de Gasto Teóricas en los Sistemas de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecidos con el DIQUE 1 (Figura 10) y el DIQUE 2 (Figura 11).

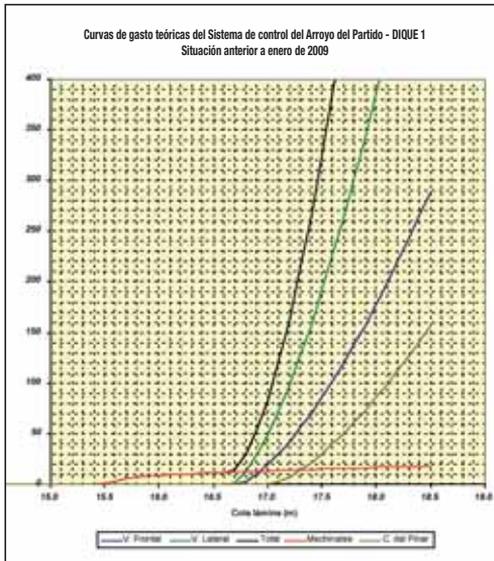


Figura 10. Distribución teórica del caudal de avenida ($m^3 \cdot s^{-1}$) en el DIQUE 1 entre sus diferentes secciones de vertido en la situación inicial (2006), con el perfil del vertedero frontal original y con los mechinales abiertos: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto al inicio del arroyo de la Cañada del Pinar por efecto de la curva de remanso aguas arriba del dique (verde-pardo).

Figure 10. Distribution of the total volume of flow ($m^3 \cdot s^{-1}$) that pass through the CHECK DAM 1 between its different spillways for the initial theoretical situation (2006), having the original frontal spillway and the weep holes open. Passing flow over the frontal spillway (blue), passing flow over the lateral spillway (green), total passing flow (black), passing flow through the weep holes (red), and passing flow at the beginning of the Cañada del Pinar stream (brown-green) as an effect of the water stored in CHECK DAM 1.

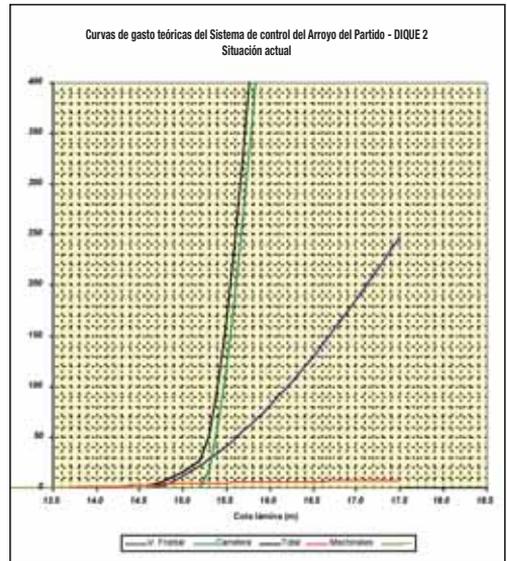


Figura 11. Distribución teórica del caudal de avenida ($m^3 \cdot s^{-1}$) en el DIQUE 2 entre sus diferentes secciones de vertido en la situación inicial (2006): gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el umbral del camino asfaltado que enlaza El Rocío con Villamanrique de la Condesa (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo).

Figure 11. Distribution of the total volume of flow ($m^3 \cdot s^{-1}$) that pass through the CHECK DAM 2, built over the Cañada del Pinar stream. The chart distinguishes between its different spillways for the theoretical current situation (2006). Passing flow over the frontal spillway (blue), passing flow over the threshold of the asphalted road that connects El Rocío and Villamanrique de la Condesa (green), total passing flow (black), and passing flow through the weep holes (red).

Rectificaciones efectuadas en el DIQUE 1 y nuevas Curvas de Gasto en el Sistema de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecido con el DIQUE 1

La rectificación planteada en el DIQUE 1, tras conocerse su comportamiento en las avenidas de los años hidrológicos 2006-07 y 2007-08, tenía por objetivo reducir en tales situaciones el caudal de paso directo al arroyo del Partido a través de su vertedero frontal; para lo que se efectuaron las siguientes operaciones: 1) Mo-

dificar el perfil inicial del vertedero frontal (2006), disminuyendo su superficie de desagüe; 2) Tapar con grava los mechinales del dique, para que durante las avenidas se retrasara la descarga a través de ellos. Con estas modificaciones, que estaban operativas en enero de 2009, el nuevo perfil del vertedero frontal del DIQUE 1 se transformó una sección trapezoidal centrado en el lecho del arroyo de 20 m en su base, 24 m en su coronación y manteniendo los 2 m de altura. Las Figuras 12 y 13 muestran la nueva imagen del DIQUE 1.



Figura 12. DIQUE 1 tras la rectificación del perfil de su vertedero frontal, operativo en enero de 2009. Fotografía de la izquierda: tal como se encontraba el 6-06-2009. Fotografía de la derecha: operativo a las 13:00 horas del día 2-02-2009, tras la avenida iniciada en la tarde-noche anterior (imagen cedida por C. URDIALES, PND).

Figure 12. CHECK DAM 1 after its frontal spillway profile was corrected, being operative in January 2009. Left photograph: the situation in June 6th 2009. Right photograph: CHECK DAM 1 working at 13:00pm in February 2nd 2009 after the flood begun the evening before (image handed up by C. URDIALES, DNP).

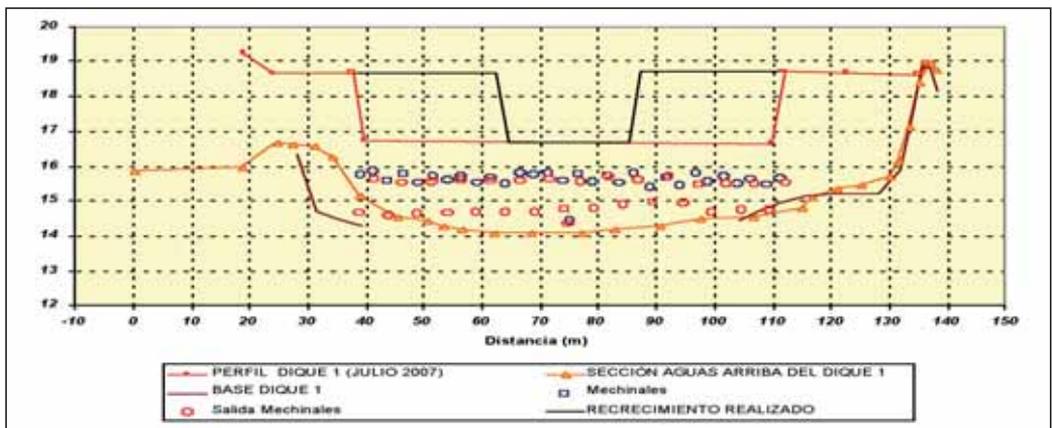


Figura 13. Alzado del DIQUE 1 con el diseño definitivo de su vertedero frontal, operativo en enero de 2009, que reduce el caudal que vierte directamente en el arroyo del Partido.

Figure 13. CHECK DAM 1 in front elevation with its frontal spillway final design working since January 2009, which reduces the flow that pours directly in the Partido stream.

Las nuevas Curvas de Gasto Teóricas en el Sistema de Control de Avenidas del arroyo del Partido establecido con el DIQUE 1 tras las rectificaciones realizadas en éste (operativas en enero de 2009) se muestran en la Figura 14. Con la información de las curvas de gasto teóricas de las Figuras 10 y 14 se elaboró la Tabla 2, que resume la distribución teórica de los caudales de 20 m³·s⁻¹; 50 m³·s⁻¹; 100 m³·s⁻¹; 200 m³·s⁻¹ y 350 m³·s⁻¹ en la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, por las diferentes secciones de vertido del DIQUE 1 y el inicio de la Cañada del Pinar, como consecuencia de la curva de remanso generada en el paramento aguas arriba del DIQUE 1, para las situaciones anterior (2006) y posterior (2009) a las rectificaciones realizadas al dique.

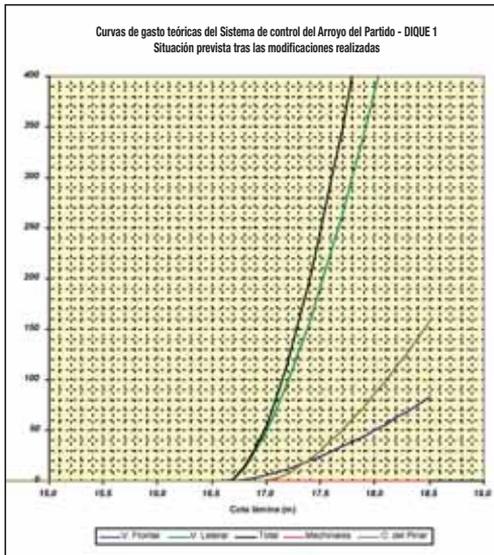


Figura 14. Distribución teórica del caudal de avenida (m³·s⁻¹) en el DIQUE 1 entre sus diferentes secciones de vertido, tras las rectificaciones realizadas (2009): Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el inicio del arroyo de la Cañada del Pinar (verde-pardo).

Figura 14. Distribution of the total volume of flow (m³·s⁻¹) that pass through the CHECK DAM 1. The chart distinguishes between its different spillways for the situation after rectification (2009): passing flow over the frontal spillway (blue), passing flow over the lateral spillway (green), total passing flow (black), passing flow through the weep holes (red), and passing flow at the beginning of the Cañada del Pinar stream (brown-green).

El efecto de las medidas adoptadas se comprobó analizando su comportamiento ante las avenidas ocurridas en el arroyo del Partido los días 1-02-2009 y 5-02-2009. El caudal máximo para del primer evento se estimó en 85 m³·s⁻¹ y el del segundo en 70 m³·s⁻¹ (Figura 15).

Sus resultados sorprendieron, porque el empuje de la corriente en la primera avenida arrastró a la grava por el hueco de los mechinales, dejando a éstos totalmente operativos, como aparece en la fotografía de la derecha de la Figura 12; además, debido a que el DIQUE 1 se ubica en un lecho totalmente arenoso, presentó filtraciones en ambas avenidas. Por ello, en las filas 8 al 12 de la columna 3 de la Tabla 2 deberían aparecer los caudales circulantes, que también deberían estar reflejados en las curvas correspondientes a la Figura 14. En la Tabla 3 se representa la distribución más probable de los caudales estimados para ambas avenidas, por los diferentes elementos de vertido del DIQUE 1.

Aunque el DIQUE 1 no tiene por el momento ni aparatos ni estructuras para medir el caudal que pasa por él (se prevé su futura instalación); se dispuso de fotografías del paso de la avenida por la sección del dique para ambas avenidas; que se pueden comparar con los caudales estimados para los mismos momentos en el gráfico de la Figura 15. En el caso de la avenida iniciada en la tarde noche del 1-02-2009, la fotografía de la derecha de la Figura 12 muestra su situación en el DIQUE 1 a las 13:00 horas locales del día 2-02-2009. Para esa hora en el hidrograma de avenida de la Figura 15 están pasando unos 15 m³·s⁻¹, lo que se adecua a lo que se muestra en la fotografía, donde todos los mechinales están desaguando casi a tope y no existe circulación del flujo por el umbral del vertedero frontal del dique (en la Tabla 3 se estima que el vertido máximo por los mechinales en un caudal de 15 m³·s⁻¹).

Para la avenida del día 5-02-2009 se dispone de las fotografías de la Figura 16; en las que se muestra el estado de la avenida del arroyo del Partido en el DIQUE 1 a las 13:10 horas locales

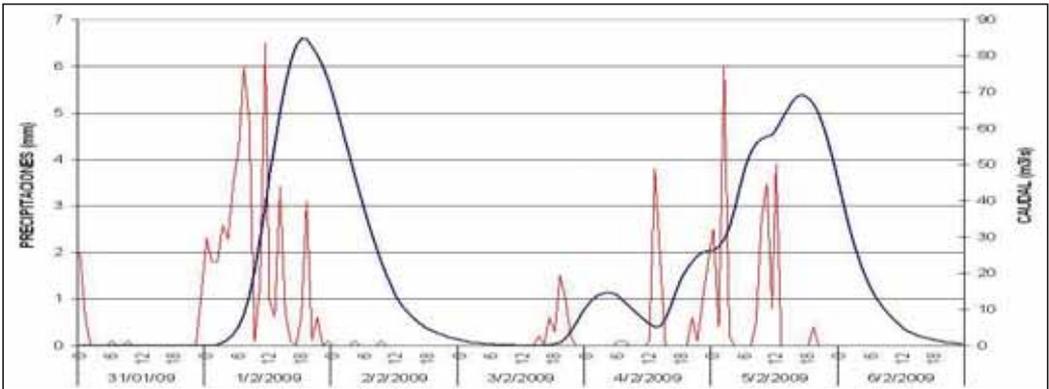


Figura 15. Precipitaciones torrenciales acaecidas en la estación de Bollullos (situada en el centro de la cuenca vertiente del arroyo del Partido) entre los días 31 de enero y 5 de febrero de 2009 (en rosa) y caudales máximos estimados en la sección del paramento aguas arriba del DIQUE 1 para los días 1 y 5 de febrero de 2009 (en azul).

Figure 15. Torrential precipitation recorded between January 31st and February 5th 2009 in the Bollullos station, placed in the Partido stream catchment basin's centre (pink). Maximum flow estimated in the cross section immediately upstream from the CHECK DAM 1 for the period from February 1st to 5th 2009 (blue).

Escenario propuesto en el dique	Caudal del evento (m ³ ·s ⁻¹)	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido (m ³ ·s ⁻¹)			
		Mechinales	Vertedero frontal	Vertedero lateral	Sección inicial de la C. Pinar
Situación 2006; con el vertedero frontal inicial y sin tapar los mechinales.	20	12	1	7	-
	50	15	10	25	-
	100	15	20	65	-
	200	15	50	120	15
	350	15	90	210	35
Situación 2009; modificado el vertedero frontal y tapados los mechinales*.	20	-	1	19	-
	50	-	5	45	-
	100	-	5	90	5
	200	-	25	155	20
	350	-	60	250	40

NOTA: (*) El vertedero de fondo del dique permanece siempre operativo.

Tabla 2. Distribución de los caudales de 20 m³·s⁻¹; 50 m³·s⁻¹; 100 m³·s⁻¹; 200 m³·s⁻¹ y 350 m³·s⁻¹ en la sección de inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido, por las diferentes secciones de vertido del DIQUE 1 y el inicio de la Cañada del Pinar.

Table 2. Distribution of the 20, 50, 100, 200 and 350 m³·s⁻¹ flows in the cross section placed in the upper part of the original sedimentary fan of the Partido stream, considering different spillway sections in the CHECK DAM 1 and the Cañada del Pinar stream beginning.

Escenario propuesto en el DIQUE 1	Caudal del evento (m ³ ·s ⁻¹)	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido (m ³ ·s ⁻¹)			
		Mechinales	Vertedero frontal	Vertedero lateral	Sección inicial de la C. Pinar
El dique con el perfil de su vertedero frontal modificado (enero 2009) y mechinales operativos.	70 ¹	15	6	49	-
	85 ²	15	9	58	3

¹ Situación previsible de la avenida del día 5-02-2009.

² Situación previsible de la avenida del día 1-02-2009.

Tabla 3. Comportamiento más verosímil del Sistema de Control del DIQUE 1 para las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009 en el arroyo del Partido.

Table 3. Most plausible behaviour of the CHECK DAM 1 Control System during the floods in February 1st and 5th 2009 in the Partido stream.



Figura 16. Estado de la avenida del arroyo del Partido en el DIQUE 1 a las 13:10 horas locales del día 5-02-2009. Según el hidrograma de avenida la descarga en el arroyo del Partido en ese momento estaría en torno a los $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Izquierda: panorámica del sistema de reparto de los caudales entre los vertederos frontal y lateral. Derecha: detalle del paso de la corriente por el vertedero frontal, por el que se estima que están descargando unos $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ por los mechinales y el resto por el umbral del vertedero). Fotografías C. URDIALES, PND.

Figure 16. The Partido stream at 13.10 pm during the flood that took place in February 2nd 2009. Regarding hydrogram, the flow of the Partido stream could be around $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at that moment. The photograph on the left shows a pan of the distribution system of the Partido stream's flow to either the frontal or lateral spillway. The photograph on the right details the passing flow over the frontal spillway, estimating a discharge of $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ at that moment ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ though the weep holes and the rest over the spill threshold). Photographs C. URDIALES, PND.

del día del evento. Atendiendo al crecimiento del hidrograma de la avenida en la Figura 15, la descarga en el arroyo en ese momento puede estar en torno a $65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La fotografía de la izquierda muestra una panorámica del sistema de reparto de los caudales del arroyo del Partido entre los vertederos frontal y lateral del DIQUE 1. La fotografía de la derecha detalla el paso de la corriente por el vertedero frontal, en el que se estima que descargan en ese momento unos $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ($15 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que pasan por los mechinales y $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ por el umbral del vertedero). El resto del caudal de la avenida $45 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ se deriva hacia la superficie de inundación-laminación sedimentación a través del vertedero lateral.

El procedimiento utilizado no es estrictamente científico, pues no existen mediciones en el propio DIQUE 1 para corroborar los supuestos adoptados; pero resulta útil y responde al criterio de las aproximaciones sucesivas para establecer la sección más conveniente que debe adoptar el vertedero frontal del dique en cuestión. Además es com-

patible con la futura instalación en el mismo de dispositivos de medida.

Tras lo analizado en el DIQUE 1 durante las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009; se abren dos posibilidades de operar ante futuras avenidas: a) cerrar los mechinales con hormigón, excepto el mechinal de fondo que se mantiene operativo; b) taponar los mechinales con una rejilla en el paramento aguas arriba del dique, para impedir que la corriente pueda arrastrar la grava a través de los mismos. En el primer caso la distribución de caudales en el DIQUE 1 se acercaría al representado en las curvas de la Figura 14 y en las filas 8 al 12 de la Tabla 2; mientras que en el segundo el tapado con grava de los mechinales no supondría que desaparezca el vertido a través de ellos (o que se retrasara hasta que haya pasado la avenida), sino que únicamente reduce el paso del caudal, porque la rejilla y la grava limitan la sección de vertido; estimando dicha disminución mediante la reducción del diámetro de los mechinales a 20 cm., con ello se pretende asumir también el efecto de la fil-

tración que se experimenta por debajo de la obra durante las avenidas importantes. La nueva simulación de las curvas de gasto se muestra en la Figura 17; aunque también se debe contemplar que, conforme se consolide el aterramiento aguas arriba del DIQUE 1, irá disminuyendo el paso del flujo por sus mechinales durante las avenidas, si bien nunca se reducirá por completo. En cualquier caso, debe permanecer el mechinal de fondo, porque además de ser un elemento estructural, contribuye a mantener un caudal permanente en el arroyo.

Un aspecto extraordinariamente importante del análisis de las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, fue verificar el comportamiento de la solera de la superficie destinada en la Actuación núm. 3 para inundación-laminación-sedimentación, ante el paso por la misma de dichas avenidas. El levantamiento topográfico realizado al área que se comenta el 6-06-2009, permitió detectar que los caudales de las mencionadas avenidas, tras su paso por el vertedero lateral del DIQUE 1, se adaptaron a la micro-topografía de los antiguos de-

ramaderos existentes en el lugar y que sólo causaron pequeñas erosiones por abrasión al pie del vertedero lateral del DIQUE 1; asimismo aparecieron arenas procedentes de deposición en una pequeña sección de su recorrido. Los resultados del levantamiento topográfico realizado al área en cuestión por nuestro equipo el 6-06-2009 (Figura 18) y las imágenes de las fotografías tomadas por el equipo de C. URDIALES del PND (Figura 19) corroboran dicha hipótesis. Luego la expansión de la corriente, salvo en las áreas directamente alteradas por el encauzamiento de 1981, se comporta como en el pasado; se forma un flujo principal centrado en una pequeña superficie de mayor calado (derramadero o caño, según las circunstancias del lugar) y una expansión lateral del flujo restante a ambos lados de la hendidura central, que circula con menor velocidad y tiende a ocupar la mayor superficie posible. Este efecto permite asumir que es posible el principal objetivo de la Actuación núm. 3; es decir, laminar e incluso descargar de sedimentos los flujos de avenida en las superficies destinadas al efecto.

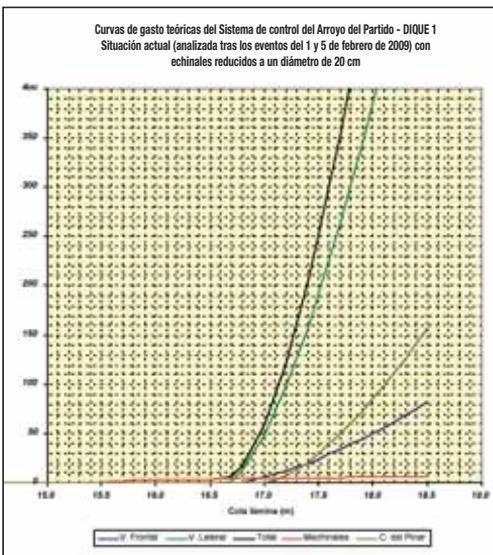


Figura 17. Distribución del caudal de avenida ($m^3 \cdot s^{-1}$) en el DIQUE 1 entre sus diferentes secciones de vertido, con el perfil frontal de 2009 y con los mechinales tapados con grava, pero parcialmente operativos. Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el inicio del arroyo de la Cañada del Pinar (verde-pardo).

Figura 17. Distribution of the total volume of flow ($m^3 \cdot s^{-1}$) that pass through the CHECK DAM 1 between its different spillways for the situation after the frontal spillway was modified (2009) and the weep holes closed with gravel but still partially operative. Passing flow over the frontal spillway (blue), passing flow over the lateral spillway (green), total passing flow (black), passing flow through the weep holes (red), and passing flow at the beginning of the Cañada del Pinar stream (brown-green).



Figura 18. Elementos del Sistema de Control de Avenidas de la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005, vistos de este a oeste. Se resaltan en el centro de la imagen las tres secciones levantadas topográficamente con un DGPS el 6-06-2009 para delimitar el paso del flujo de las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009 por el área destinada en la Actuación núm. 3 a inundación-laminación-sedimentación: a) primera sección, más próxima al vertedero lateral del DIQUE 1 (verde con triángulos); b) segunda sección, aguas abajo de la primera (azul) y c) tercera sección la situada en la parte más baja de la figura (azul claro).

Figure 18. Flood Control System elements in the Doñana 2005 project, Intervention number 3. View from East to West. Three cross sections surveyed with DGPS on June 6th 2009 are highlighted in the centre of the image to delimit the pass of the flow of flood on February 1st and 5th 2009 in the flood-lamination-sedimentation area: a) first, Partido stream cross section upstream CHECK DAM 1 (green with triangles); b) second, downstream the first one (blue), and c) third, cross section placed in the lower part of the figure (light blue).



Figura 19. Situación generada por las avenidas del arroyo del Partido en el vertedero lateral del DIQUE 1 y en el área de inundación-laminación establecida en la Actuación núm. 3. Fotografías superiores: a las 13:40 horas locales del día 2-02-2009. Fotografías inferiores: a las 13:20 horas locales del día 5-02-2009. Imágenes de la izquierda: vertedero lateral del DIQUE 1. Imágenes de la derecha: inundación en el área reservada al efecto, que se adecua a la topografía definida por los antiguos derramaderos existentes en el lugar. (Fotografías C. URDIALES, PND).

Figure 19. CHECK DAM 1's lateral spillway during a flood and the flood-lamination surface established in the Intervention number 3. Top photographs: at 13.40 pm local time in February 2nd 2009. Bottom images: at 13.20pm local time in February 5th 2009. Left images: CHECK DAM 1's lateral spillway. Right images: flood on the terrain thought for this purpose and its behaviour adjusting itself to the old drainage system topography. (Photographs C. URDIALES, DNP).

Desagüe del flujo de las avenidas del arroyo del Partido en la marisma del PND, tras su laminación y deposición de los sedimentos transportados en la superficie destinada al efecto en la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005

Se ha expuesto: *a)* cómo se ha proyectado el Sistema de Control de Avenidas en el arroyo del Partido; *b)* el modo en que se ha ejecutado dicho proyecto sobre el terreno en el escenario previsto para ello y *c)* las posibilidades que existen para generar una nueva superficie de inundación-laminación-sedimentación de las avenidas del arroyo del Partido que resulte operativa y eficiente, antes que su corriente descargue en la marisma laminada y desprovista de sedimentos. Falta por explicar cómo era y cómo debe ser en el futuro la descarga final de las avenidas del arroyo del Partido en la marisma del PND, para que ésta no vea alterados sus contornos por procesos de sedimentación.

Para ello, se investigó sobre lo que ocurría en el pasado anterior al encauzamiento del arroyo del Partido en 1981. Las fuentes recurridas fueron: *a)* la morfología que presentaba el caño Ajolí, que actuaba como un verdadero canal de desagüe del arroyo del Partido en el entorno de la aldea de El Rocío; *b)* el testimonio de personas del lugar que podían aportar sus recuerdos del pasado. Ninguna de ellas debía contradecirse con las ecuaciones físicas, universalmente aceptadas, de continuidad y del movimiento del agua en los cauces abiertos.

A través de la primera fuente se sabe que, con anterioridad al encauzamiento del arroyo del Partido (1981) la corriente de sus avenidas, tras expansionarse sobre su primitivo cono de sedimentación, donde experimentaba los procesos de laminación y descarga de sedimentos, drenaba hacia varios canales de desagüe de dicho cono, para a través de ellos descargar a la marisma del PND en un régimen permanente. Uno de estos canales, también llamados caños, era el caño Ajolí, que desembocaba en la marisma de El Rocío. Tras el encauzamiento (1981) el caño Ajolí quedó aterrado; pero a medida que el nuevo cono de sedimentación for-

mado sobre la marisma se ha ido estabilizando, porque la corriente de las avenidas del arroyo que llega hasta el paraje de El Rocío se ha ido reduciendo tras la construcción del DIQUE 1 (2006), el arroyo ha ido adquiriendo una geomorfología de tipo caño en su tramo final previo a su afluencia en la zona inundada de la marisma de El Rocío, similar a la que tenía en el pasado; aunque en este último caso el caño se formaba a más de un Km. aguas arriba de donde se ha formado el actual.

La morfología de los caños se analizó sobre los restos que quedaban sin alterar del caño Ajolí URDIALES (1996), MINTEGUI *et al* (2003). Esquemáticamente respondía a una sección con una concavidad pronunciada, excavada sobre un relieve convexo, con una anchura en la base variable, oscilando del orden de 1,50 m aproximadamente, que se ensancha conforme asciende hacia la superficie, hasta alcanzar una sección máxima de unos 10 m en la zona más exterior, todo ello para una profundidad máxima del cauce de unos 2 m y una pendiente media de $0,00165 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$. Por él circula el agua en los momentos de caudales mínimos. En las avenidas extraordinarias este perfil se extiende a ambos márgenes del curso de aguas mínimas, inundando las superficies adyacentes a ambos lados del cauce. De este modo en situaciones de avenidas se obliga a la corriente a divagar por la superficie, circulando el flujo con una anchura variable y unos calados igualmente variables, altos para la zona central del cauce (que se reduce a un máximo de unos 10 m) y bajos para el resto de la divagación (que puede extenderse a cientos de metros a cada lado del cauce); con ello las tensiones de arrastre del flujo resultan altas en el centro del cauce y bajas para el resto de la circulación de la avenida, garantizando de este modo la estabilidad del terreno en la zona anterior a la marisma, pues el cauce central representa una porción muy pequeña de la lámina de inundación.

El cauce que actualmente presenta el arroyo del Partido antes de desembocar en la zona inundada de la marisma, adopta un perfil similar al de su antiguo caño. El pasado 17-10-2008 se midió una sección del arroyo en el tramo en

cuestión (Figura 20). Las operaciones realizadas en dicha sección se detallan en la Tabla 4; en cuya última columna se estima la capacidad de evacuación para la situación de llenado total del caño (como se muestra en la Figura 21) en $4,06 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; dato que se ha tenido en cuenta en la rectificación del perfil del vertedero frontal del DIQUE 1 en la Actuación núm. 3. Se trata en principio de un valor que puede responder a la capacidad natural de evacuación del caño; es decir, a la que se adecua a un caudal generador del lecho ligado a su pendiente de compensación; esta última se ha establecido mediante mediciones directas en el terreno. En cualquier caso, se insiste que el caudal de $4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ corresponde a situaciones de avenidas ordinarias en

el tramo final del arroyo del Partido, que se asocia a caudales de avenidas aguas arriba del DIQUE 1 del orden de $20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

Los trabajos de campo, efectuados en el cono de sedimentación del arroyo del Partido entre julio y octubre de 2008, mostraron que para un caudal del orden de $0,3 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en tramo final del caño del Partido (Figuras 20 y 22) su cono de sedimentación no presentaba crecimiento aparente. Para caudales superiores hasta los $4,06 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (Tabla 4) la emisión de sedimentos a la marisma se puede mantener en valores moderados, pues la avenida sigue concentrada en el caño, por lo que en la práctica el transporte casi se reduce a los sedimentos en suspensión.

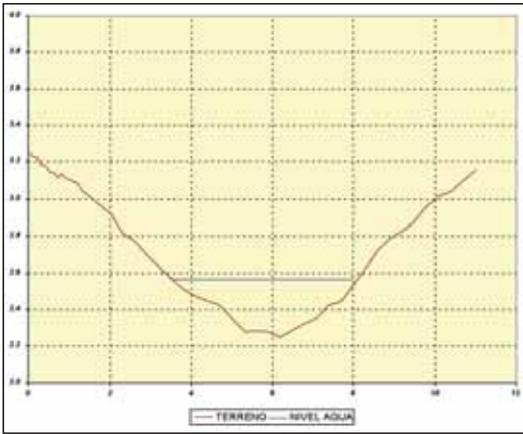


Figura 20. Sección de aforo en el arroyo del Partido, transformado en caño, en el tramo anterior a su afluencia en la zona inundada de la marisma de El Rocío, el 17-10-2008. Izquierda: Grafico de la sección. Derecha: Fotografía de la sección. La valla que aparece en la misma es el linde del Parque Nacional de Doñana en dicho paraje.

Figure 20. Flow measuring cross section in the Partido stream turned into a drainage (caño) in the previous reach to its mouth in the flooded part of the El Rocío marsh, October 17th 2008. Left: cross section chart. Right: cross section photograph. The fence marks the limit of de Doñana Nacional Park in this area.

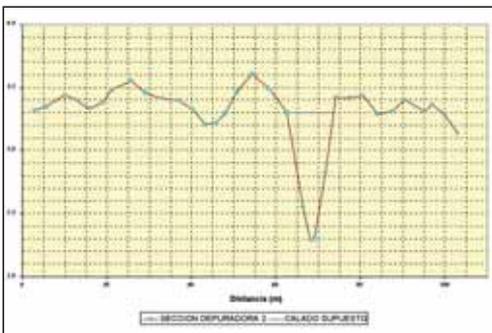


Figura 21. Calado en la sección del arroyo del Partido representada en la Figura 20, para el supuesto que transporte un caudal de $4,06 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; prácticamente llena.

Figure 21. Water level in the Partido stream's cross section represented in the Figure 20 assuming a flow of $4.06 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. It's practically full.

PENDIENTE		AFORO 17-10-2008			SECCIÓN LLENA
Distancia	196 m	Distancia	5,3 m	Área mojada: 0,840 m ²	Área mojada: 6,6648 m ²
H máx.	3,0990 m	Tiempos	15,78 s	Calado medio: 0,200 m	Calado medio: 0,5065 m
H mín.	2,6474 m		11,00 s	V. media*: 0,3295 m·s ⁻¹	n: 0,037 (Manning)
Pendiente	0,0023		13,70 s	Pendiente: j = 0,0013	Pendiente: j = 0,0013
			12,23 s	n: 0,037 (Manning)	V. Manning: 0,6098 m·s ⁻¹
Distancia	331 m		15,00 s	V. Manning: 0,3282 m·s ⁻¹	CAUDAL: 4,0644 m³·s⁻¹
H máx.	2,6474 m		11,50 s	CAUDAL: 0,2768 m³·s⁻¹	
H mín.	2,2300 m		16,00 s	(*) Velocidad media = 0,85 Velocidad superficial	
Pendiente	0,0013		15,00 s		
			13,20 s		
Distancia	386 m		14,00 s	V. Manning = Velocidad calculada aplicando la ecuación de Manning	
H máx.	2,2300 m	13,00 s			
H mín.	2,0958 m				
Pendiente	0,0003	Velocidad superficial 0,3876 m·s ⁻¹			

Tabla 4. Operaciones realizadas en la sección de aforo de la Figura 21 para establecer sus parámetros hidráulicos fundamentales. En la columna del centro se muestran dichos parámetros para la situación del día 17-10-2008, hacia las 13:00 horas. En la columna de la derecha se estiman los mismos parámetros en el supuesto que el caño se encuentre prácticamente lleno (Figura 21).

Table 4. Works made in the flow cross section shown in Figure 21 in order to establish the fundamental hydraulic parameters. The central column expresses those parameters for the situation that took place around 13 pm in October 17th 2008. In the column on the right side the same parameters are estimated for the situation in which the drainage is practically full (Figure 21).



Figura 22. Desembocadura del arroyo del Partido, convertido en caño, en la marisma de El Rocío en julio de 2008

Figure 22. Mouth of the Partido stream, turned into a drainage (caño), in the El Rocío marsh, July 2008.

Podría estimarse que el caudal que debe circular en el tramo final del arroyo del Partido, el anterior a su afluencia en la zona inundada de la marisma, debe mantenerse entre dichos valores $0,3 < Q \text{ (m}^3\cdot\text{s}^{-1}\text{)} < 4,06$ y que los mismos se pueden identificar con los caudales generadores del lecho medio y máximo res-

pectivamente. De igual manera se aclara que aunque la pendiente de compensación del tramo final del arroyo del Partido se ha establecido en $0,0016 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$; las pendientes locales del arroyo van disminuyendo conforme se aproxima su afluencia en el área inundada de la marisma.

Si el caudal de avenida supera dichos valores, el mejor modo de operar con ellos es permitiendo a la corriente que se expande a ambos lados del caño central, para lo que se necesita dejar el espacio suficiente; desplazando las motas de protección a los límites del mismo; de este modo se reduce la tensión de tracción del flujo y se posibilita una última laminación y deposición de los sedimentos antes de que la corriente afluya a la marisma. De manera natural las avenidas tienen a expandirse y a ocupar la mayor superficie siempre que es posible (Figura 23, fotografía de la izquierda).

pasado anterior a 1981, para no causar problemas en el entorno oriental de la aldea de El Rocío; se analizan las situaciones posibles que se pueden presentar tras la ejecución la Actuación núm. 3; así como el modo en que dicha Actuación contribuye a solucionarlas:

1) Mientras los caudales de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 sea $< 20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; la situación está controlada; incluso para el supuesto representado en las curvas de gasto de la Figura 17, pues supondría una descarga directa al arroyo del Partido $< 6 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ para una distancia entre



Figura 23. Izquierda: Panorámica del arroyo del Partido el 21-03-1997 en el paraje situado al este de la aldea de El Rocío tras las avenidas torrenciales de enero y febrero del año 1997. Se observa la tendencia de la inundación a ocupar el mayor espacio posible, con lo que reduce la tensión de tracción de la corriente y su capacidad erosiva. Derecha: El mismo paraje el 17-02-2007, tras el paso en los días previos de una avenida por el arroyo del Partido. Se observa el muro de tierra realizado en el margen derecho del arroyo, para impedir la inundación por ese lado, que concentra el caudal de la corriente y aumenta su tensión de tracción y capacidad erosiva.

Figure 23. Left: Pan of the Partido stream on March 21st, East from El Rocío village, after torrential floods took place during January and February of 1997. It is observed that the flood tends to take up all the available space, reducing the shear stress and its erosive capacity. Right: same place in Feb 17th, 2007, after a flood of the Partido stream passed the previous days. In the picture is shown the wall of sand built over the right bank of the stream to avoid floods toward that direction, concentrating the flow and increasing the shear stress and its erosive capacity with it.

Resumiendo sobre la cuestión del desagüe final de los caudales de avenida del arroyo del Partido en la marisma del PND, cabe diferenciar entre: A) la situación planteada en el tramo final del arroyo-caño del Partido en la marisma de El Rocío; B) la funcionalidad para tal fin del arroyo de la Cañada del Pinar.

A) En lo que respecta al tramo final del arroyo-caño del Partido: *a)* atendiendo a lo expuesto en este último epígrafe; *b)* considerando los valores establecidos en la Tabla 2 y *c)* asumiendo que dicho caño debe comportarse del modo más parecido posible a lo que hacía en el

la sección donde se ubica el dique y la desembocadura del arroyo del Partido en la zona inundada de la marisma superior a 5 Km.; en los que dicha descarga se puede laminar, sobre todo teniendo en cuenta que en el tramo inmediatamente anterior a la zona inundada existe una amplia llanura, que antes del encauzamiento del arroyo del Partido fue marisma.

2) Si el caudal de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 está comprendido entre $20 < Q (\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}) < 100$; la descarga directa al cauce del arroyo por el vertedero frontal del DIQUE 1 en la Tabla 2

aporta un valor teórico de $5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; pero puede alcanzar un valor de $15 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en las curvas de gasto que se representan en la Figura 17; en la práctica hay que operar en torno a ese intervalo de valores; pero la situación también resulta controlable; de hecho las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009 se estima que descargaron por encima de los $20 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ y no crearon en la superficie del entorno oriental de la aldea de El Rocío problemas serios de inundación-sedimentación. Sin embargo se debe planificar dicha superficie, para que la corriente circule por ella como se asume que lo hace por un caño en el paraje en cuestión, concentrando los $4 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ en la propia sección del caño y expansionándose los restantes $11 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ a ambos lados del mismo; para lo que es preciso evitar los posibles obstáculos al movimiento de la corriente que pudieran impedirlo. De no conseguir este efecto, el arroyo del Partido podría generar nuevos derramaderos hacia el oeste y crear nuevas situaciones no deseables en el entorno de la aldea de El Rocío; aunque no fueran tan graves como las que ocurrieron en el pasado.

3) Si el caudal de avenida del arroyo del Partido aguas arriba del paramento superior del DIQUE 1 es $> 100 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$; hay que contemplar las circunstancias siguientes: *a)* los caudales que se estima que lleguen hasta el entorno de la aldea de El Rocío se reducen por debajo del 15% de los que llegaban antes de la construcción y rectificación del DIQUE 1 (2009); lo que representa una mejora muy significativa; *b)* que dichos caudales, aunque sean elevados (en la Tabla 2 se señala hasta $60 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), son de un orden de magnitud que permiten pensar en una planificación; *c)* la frecuencia de estas avenidas es mucho menor. A todo ello, hay que añadir que la Actuación núm. 3 también contribuye a asegurar el caudal de régimen normal del arroyo del Partido en el entorno en cuestión, lo que supone una recuperación hidro-ecológica importante del mismo.

B) En lo que afecta a la funcionalidad del arroyo de la Cañada del Pinar, como segundo cauce de desagüe para el agua almacenada en el área destinada en la Actuación núm. 3 para inundación-laminación-sedimentación tras las

avenidas del arroyo del Partido; hay dos razones que apuntan que en el pasado estuvo operativo:

1) La disposición de la red de drenaje natural en el paraje en cuestión, junto con los testimonios de la gente del lugar que conocieron su funcionamiento anterior al encauzamiento del arroyo del Partido (1981). Todo apunta que el caudal que tras las avenidas se concentraba en el arroyo de la Cañada del Pinar, se dirigía a otro curso de mayor sección de evacuación, llamado Caño Mayor y, a través de éste último y conjuntamente con su caudal, descargaba a la marisma del PND en el paraje de la marisma gallega. Situación que se ha vuelto a reproducir en las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, aunque hayan transcurrido 25 años sin que tuviera lugar.

2) La verificación de la ecuación de continuidad: si por el caño Ajolí discurría un caudal que no rebasaba en avenidas ordinarias los $5 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, lo razonable es suponer que en las máximas avenidas, como mucho, se quintuplicara ese caudal; porque de lo contrario no se hubiera conservado la geomorfología del caño Ajolí. De hecho, ésta se alteró por completo con las avenidas del arroyo del Partido que llegaban hasta El Rocío tras su encauzamiento; que multiplicaron por veinte e incluso por más dicho valor. Por tanto, el caudal de avenida que no se dirigiera a la marisma de El Rocío, tenía que descargar a la marisma por otro paraje.

Pero la cuestión no radica en la distribución de los caudales de avenida entre los diferentes canales o caños de desagüe, como en la posibilidad que dichos caudales alcancen valores que provoquen erosión de fondo en sus cauces de evacuación, como ocurrió en el tramo encauzado del arroyo del Partido entre 1982-2006. Esta cuestión retrasó la redacción y ejecución de la Actuación núm. 3 y posteriormente ha sido la causa de la rectificación del perfil del vertedero frontal del DIQUE 1, para asegurarse que el actual cono de sedimentación situado sobre la marisma se estabilice y se eviten problemas de inundación-sedimentación en el entorno oriental de la aldea de El Rocío;

pero se abre el interrogante de lo que pudiera ocurrir en el cauce del Caño Mayor en el futuro.

Lógicamente la única forma de conocer lo que pueda suceder en el futuro en Caño Mayor es a través de un Seguimiento; pero hay motivos para suponer que: *a*) si no se le altera su geomorfología (no se actúa sobre su sección de desagüe, ni se ponen obstáculos para la circulación de la corriente) y *b*) se comporta como anteriormente se ha descrito que funcionan los caños en el paraje que se comenta; puede conducir los caudales procedentes de la nueva superficie de inundación-laminación-sedimentación hacia la marisma, sin provocar problemas geo-torrenenciales de importancia en su recorrido; además de contribuir a la alimentación de las capas freáticas del lugar, cuya falta de agua en los últimos años parece afectar a la vegetación arbolada de la misma.

CONCLUSIONES

Se ha expuesto el Seguimiento del proyecto de corrección hidráulica e hidrológica del tramo final del arroyo del Partido, un curso manifiestamente torrencial que vierte directamente a la marisma de El Rocío en el Parque Nacional de Doñana. La corrección de todo curso torrencial implica la adaptación de las obras ejecutadas y de las disposiciones adoptadas con el proyecto restaurador, a la dinámica geo-torrencial que los futuros eventos o precipitaciones torrenciales impriman en el curso corregido; lo que obliga a conocer la incidencia de dichos eventos sobre lo ejecutado y/o dispuesto con el proyecto, para planificar las rectificaciones pertinentes, a fin de alcanzar a largo plazo los objetivos previstos con las actuaciones proyectadas, en este caso con la Actuación núm. 3 del Proyecto DOÑANA 2005.

Dado que el escenario objeto del proyecto, en la fecha anterior a su redacción, se encontraba alterado por los efectos causados por el geodinamismo torrencial, motivado por las avenidas torrenciales acaecidas en el arroyo del Par-

tido tras el encauzamiento de su tramo final (1981); lo primero que se proyectó fue un Sistema de Control para las futuras Avenidas de dicho arroyo; para a continuación, en base al mismo, ejecutar el proyecto realizando las obras diseñadas y adoptando las disposiciones espaciales necesarias para la operatividad y eficacia de las mismas (2006). Posteriormente, tras comprobar el comportamiento de lo realizado ante los nuevos eventos torrenciales acaecidos en el escenario de la restauración, se proyectaron y ejecutaron las rectificaciones pertinentes, que estaban disponibles en enero de 2009. Este mismo año se comprobó el comportamiento del nuevo escenario rectificado ante dos avenidas importantes acaecidas los días 1 y 5 de febrero; para conocer la nueva situación e ir planificando nuevas rectificaciones en el futuro, hasta conseguir que tanto hidráulicamente como desde el punto de vista hidrológico el arroyo del Partido recupere la funcionalidad que presentaba con anterioridad a su encauzamiento (1981), garantizando de este modo que su circulación por el entorno oriental de la aldea de El Rocío no cause problemas de inundación-sedimentación en el mismo, sino que estos procesos se trasladen a una superficie destinada en el proyecto para tal fin, aguas arriba del paraje de El Rocío y próxima a donde en el pasado se ubicaba el primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido.

Más que conclusiones específicas, que deberían centrarse en la investigación de cuestiones concretas, relacionadas con futuras rectificaciones a realizar sobre el proyecto inicial de reconstrucción del arroyo del Partido; lo que se ha querido transmitir es la metodología de la restauración de un curso torrencial que ha sufrido procesos de alteración y degradación por fenómenos geo-torrenenciales, originados por causas naturales o provocadas e incluso por ambas a la vez. Dicha metodología implica en primer lugar conocer el estado físico y el funcionamiento del curso a corregir y de su cuenca vertiente; a continuación controlar los fenómenos geo-torrenenciales del curso en cuestión mediante un proyecto de restauración fundamentalmente hidráulico y, posterior-

mente, conseguir su plena recuperación hidrológica y ecológica, mediante un proceso de aproximaciones sucesivas, donde la restauración hidrológico-forestal de la cuenca y la recuperación de las riberas aseguren la efectividad de las obras hidráulicas en el transcurso de la consolidación del proyecto hidráulico.

AGRADECIMIENTOS

El proyecto de Seguimiento que se ha descrito, es una síntesis del trabajo realizado tras la ejecución del proyecto de restauración hidráulica-hidrológica del tramo final del arroyo del Partido, que forma parte del Proyecto DOÑANA 2005 de Regeneración Hídrica del Parque Nacional de Doñana, concretamente se trata de su Actuación núm. 3. Se reconoce a la

Comisión Científica del Proyecto Doñana 2005 y en especial a su primer Coordinador D. Félix Manuel Pérez Miyares la confianza que depositó en nuestro equipo para llevar a cabo este trabajo. Asimismo se agradece al Director de las Obras del Proyecto D. Benigno Bayán Jardín y al Asesor Técnico del Área de Conservación del Parque Nacional de Doñana D. Carlos Urdiales Alonso, su continua colaboración en el desarrollo del presente Seguimiento; sin ellos nuestro esfuerzo se hubiera reducido a un estudio teórico. También queremos reconocer su colaboración en los trabajos de campo a Juan Ignacio García Viñas, Hardin Palacios, Abel Valero Lanchó y Diego García Díaz. Finalmente agradecemos a la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA) su contribución en nuestros trabajos en el Espacio Natural de Doñana.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MAO L. (2004) *Analisi comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici*. Tesis Doctoral, pp. 307, Dipartimento Territorio e Sistema Agro-Forestali, Università degli Studi di Padova (Italia).
- MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE (2002) Resumen de la Actuación núm. 3 Restauración del arroyo del Partido, Fase I, 15 pp., 4 planos, Proyecto DOÑANA 2005 (Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana), Diciembre.
- MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C. (2001) *Bases para la elaboración de un modelo del terreno de la marisma del Parque Nacional de Doñana*, pp. 244, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid. ISBN: 84-8014-352-5.
- MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C., SENDRA ARCE P. J. (2003) *Avenidas torrenciales en el arroyo del Partido y su incidencia en la marisma del Parque Nacional de Doñana*, pp. 373, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid. ISBN: 84-8014-515-3.
- MINTEGUI J. A., ROBREDO J. C., SENDRA P. J. (2004) Development of sedimentation into the northern wetland of the Doñana National Park (Spain), *IAHR-UPM Congress, Proceedings of Fifth International Symposium on Eco-hydraulics, September 12-17, 2004, Aquatic Habitat: Analysis & Restoration*, Madrid (Spain), Vol. 1, pp. 274-280, Madrid
- MINTEGUI AGUIRRE J. A. (2005) El arroyo del Partido: Un ejemplo de los desafíos que plantea la restauración hidrológica, *Doñana: Agua y Biosfera* (editores: García Novo F. & Marín Cabrera C.), pp. 137-140, Ministerio de Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Doñana 2005, UNESCO y MAB.
- MINTEGUI AGUIRRE J. A., LENZI M. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C., MAO L. (2006) *Movilización versus estabilización de los sedimentos en cursos sometidos a la dinámica torrencial*, pp. 143, Naturaleza y Parques Nacionales, Serie Técnica, Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, ISBN: 978-84-8014-665-4.

- MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C., GARCÍA VIÑAS J. I. (2006) Análisis del impacto sobre la hidrología superficial y en las posibles alteraciones morfológicas sobre la marisma, Trabajos de campo y estudio del estado físico de la marisma en la fase anterior a las actuaciones del Proyecto DOÑANA 2005, Memoria 129 pp., 7 anexos, Seguimiento del Proyecto DOÑANA 2005, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.
- MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C., DE GONZALO ARANO C.; HUELIN RUEDA P. (2008) Situación en octubre de 2008 de las obras de recuperación hidráulica e hidrológica efectuadas con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, en el tramo del arroyo del Partido anterior a su afluencia en la marisma de El Rocío. Memoria 2007-08, 71 pp., Seguimiento del Proyecto DOÑANA 2005, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid
- MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C., DE GONZALO ARANO C.; HUELIN RUEDA P. (2009) Análisis del impacto sobre la hidrología superficial y en las posibles alteraciones morfológicas sobre la marisma, Trabajos de campo y estudio del estado físico de la marisma en la fase posterior a las actuaciones del Proyecto DOÑANA 2005, Memoria: Análisis de la formación del cono de sedimentación en un curso torrencial: Aplicación a la situación del arroyo del Partido en la marisma de El Rocío (Parque Nacional de Doñana), 139 pp., Seguimiento del Proyecto DOÑANA 2005, Escuela T. S. de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.
- ROBREDO SÁNCHEZ J. C., MINTEGUI AGUIRRE J. A., DE GONZALO ARANO C., HUELIN RUEDA P. (2008) Memoria anual del Proyecto de ampliación seguimiento y actualización del modelo sedimentario de la marisma del Parque Nacional de Doñana, 110 pp., Anexo 49 pp., Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Departamento de Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.
- SAURA J.; BAYÁN B.; CASAS J.; RUIZ DE LARRAMENDI A.; URDIALES C. (2001) *Documento marco para el desarrollo del Proyecto Doñana 2005, Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana*, 201 pp., Ministerio de Medio Ambiente.
- SENDRA ARCE P. J. (2002) *Investigación cuantitativa del transporte de sedimentos no cohesivos en avenidas torrenciales: Aplicación al caso del arroyo del Partido, Huelva*. Tesis Doctoral, pp. 400, Departamento de Ingeniería Forestal, Escuela T. S. Ingenieros de Montes, Universidad Politécnica de Madrid.
- SENDRA ARCE P. J., MINTEGUI AGUIRRE J. A., ROBREDO SÁNCHEZ J. C. (2002), El arroyo del Partido: un torrente dormido, *Medio Ambiente M. A.*, núm. 41, pp. 52-57, Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- URDIALES ALONSO C. (1996) Cambios recientes en el tramo final del arroyo del Partido, Parque Nacional de Doñana (Informe), 30 pp., Anexo fotográfico 45 pp., Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.