

ANÁLISIS DE LA ADECUACIÓN DE LAS ACCIONES RESTAURADORAS EFECTUADAS EN EL CONO DE SEDIMENTACIÓN DE UN CURSO TORRENCIAL, ANTE LA INCIDENCIA EN EL MISMO DE EVENTOS EXTRAORDINARIOS DURANTE EL INVIERNO DE 2009-10

ANALYSIS OF THE ADEQUACY OF THE RESTORING ACTIONS APPLIED TO A SEDIMENTATION FAN OF A TORRENTIAL STREAM, DURING THE EXTREME RAINFALL EVENTS OCCURRED DURING THE WINTER 2009-2010

Juan A. Mintegui Aguirre¹, José C. Robredo Sánchez, Pablo Huelin Rueda y Carlos de Gonzalo Aranoa

RESUMEN

Se analiza el comportamiento de la restauración del tramo final del arroyo del Partido, un curso torrencial que vierte a la marisma del Parque Nacional de Doñana, espacio declarado por la UNESCO Patrimonio de la Humanidad, cerca de la población de El Rocío, provincia de Huelva, en el extremo suroeste de España, tras la ocurrencia en la zona entre el 20-12-2009 y el 5-02-2010 de seis eventos torrenciales extraordinarios, del mismo rango que los utilizados como hipótesis de partida para redactar el proyecto restaurador, el cual constituye la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005. Con el proyecto restaurador se pretendió mantener la estabilidad en los límites de la marisma, mediante el control de las avenidas del citado arroyo en el paraje en cuestión. Con el análisis planteado se espera adquirir un conocimiento práctico del grado de cumplimiento de los objetivos de la Actuación núm. 3, e indagar en los efectos secundarios que la misma pueda causar en el territorio hasta donde alcanzara su influencia; pues tratándose de fenómenos torrenciales las soluciones definitivas solo se consiguen tras una adaptación del medio a los mismos; lo que exige mantener un continuo seguimiento de las acciones emprendidas.

Palabras clave: sistema de control de avenidas, impacto sobre actuaciones, restauración hidrológica, recuperación ecológica.

SUMMARY

In this paper it is presented a performance analysis of the restoration actions conducted at the lower reach of the El Partido stream, a torrential watercourse flowing into the Doñana National Park marshes –declared UNESCO Heritage site–, at El Rocío village, Huelva (extreme SW of Spain). The analysis is based on six extreme torrential events occurred between 20th Dec 2009 and 5th Feb 2010. These torrential events ranged over the same flow rates as those used as starting hypothesis to draft the restorer project (the Action num. 3 of the project Doñana 2005). The aim of this restoration project was to maintain the steadiness of the limits of the marsh, by controlling the flow rates getting to the lower reach of the aforementioned stream. With this analysis it is intended to acquire a practical knowledge of the degree of fulfilment of the project objectives, and to investigate the secondary effects occurred across the territory; since regarding torrential phenomena the definitive solutions are only achieved by an environment adaptation to them; which requires a continuous monitoring of the actions undertaken.

Key words: flood control system, actions impact, hydrologic restoration, ecologic recovery

INTRODUCCIÓN

El arroyo del Partido es un pequeño curso de carácter torrencial de 39 Km. de longitud y 307,67 km² de cuenca vertiente, que descarga a la marisma del Parque Nacional de Doñana cerca de la población de El Rocío, en la provincia de Huelva situada en el extremo suroeste de España. El PND es un espacio declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO (1994), que sirve de tránsito a las aves migratorias entre el Norte de Europa y el Continente Africano. En 1981 el tramo final del arroyo fue objeto

de un encauzamiento, coincidiendo con un plan de puesta en cultivo del área dominada de su cuenca; lo que causó que el tramo canalizado funcionara como la prolongación de la garganta del curso torrencial, alterando la morfología inicial del arroyo y causando un nuevo cono de sedimentación de grandes proporciones (4,3 Km² de superficie y 4,48 millones de m³ de volumen) en el interior de la marisma del PND (Sendra, 2002; Mao, 2005; Mintegui et al., 2006).

Entre 1995-2003 se realizaron varias investigaciones sobre dicho proceso y durante el verano de

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 (España), Tel. +34 91 3367118, juanangel.mintegui@upm.es

2006, en el marco de un amplio programa de Recuperación Hídrica de la marisma del PND conocido como Proyecto Doñana 2005 (Saura et al., 2001), se ejecutó un sistema hidráulico para el control de las avenidas en el arroyo en cuestión y la restauración de su primitivo cono de sedimentación, a través de la Actuación núm. 3 del citado Proyecto. En los tres años siguientes 2006-09 se efectuó un Seguimiento al mencionado sistema hidráulico, lo que permitió realizar algunas rectificaciones al mismo, para mejorar el grado cumplimiento de los objetivos de la Actuación núm. 3 (Mintegui et al., 2009). Pero hasta el invierno del presente año hidrológico 2009-10 no han tenido lugar en este paraje unos eventos torrenciales extraordinarios, que confirmaran la adecuación de las medidas adoptadas.

OBJETIVO

El propósito de este artículo es analizar el comportamiento de las acciones (obras y disposiciones adoptadas sobre el terreno) ejecutadas sobre el antiguo cono de sedimentación del arroyo del Partido con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, utilizando de referencia seis eventos torrenciales extraordinarios acaecidos durante el invierno del año hidrológico 2009-10, que presentan una gran aproximación a las condiciones de cálculo con las que se concibió el proyecto; para tener un conocimiento práctico del grado de cumplimiento de sus objetivos, es decir, de los aspectos positivos conseguidos, y para percatarse también de las situaciones problemáticas que lo realizado en el territorio con la Actuación núm. 3 ha generado; pues siempre que se trate de fenómenos torrenciales, se debe insistir que no caben soluciones definitivas; sino una adaptación a ellos, que se adecue a las necesidades de uso del territorio; lo que sólo resulta posible con un seguimiento de lo realizado.

METODOLOGÍA

Esquema y explicación del funcionamiento previsto para sistema hidráulico de control de avenidas realizado en el verano de 2006 en el tramo final del arroyo del Partido

El primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido obligaba a sus avenidas a expansionarse antes de alcanzar la marisma del PND, causando con ello: a) su laminación, b) una pérdida de carga en las mismas y c) el depósito de gran parte de los materiales que transportaban hasta el lugar. Con el sistema hidráulico planteado con la Actuación núm. 3 se pretendió conseguir los mismos efectos (Mintegui et al. 2010); por lo que se estableció un área de inundación-laminación-sedimentación que ocupara una parte importante de la superficie que constituía el primitivo cono de sedimentación del citado arroyo con anterioridad a 1981. Dicha área se ubicó en el margen izquierdo del arroyo del Partido, comprendida

entre su cauce y la de otro arroyo conocido por la Cañada del Pinar que discurre al este del mismo; su superficie presenta una ligera pendiente hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y el control de la inundación en ella se realiza a partir de dos diques. El primero, Dique 1, actúa como director del sistema hidráulico planteado y se ubica en el arroyo del Partido en un emplazamiento próximo al inicio de su primitivo cono de sedimentación; tiene dos vertederos, uno frontal al propio arroyo que permite el paso de una pequeña parte de las avenidas aguas abajo del mismo, y otro lateral que desvía el grueso de las avenidas hacia el área de inundación-laminación-sedimentación establecida. El segundo, Dique 2, está situado en el arroyo de la Cañada del Pinar y sus cometidos son mantener el régimen subcrítico aguas arriba del mismo y regular el caudal vertiente directo al arroyo de la Cañada del Pinar, asegurando con ello la expansión de las avenidas por el área de inundación (Figura 1); a la cual le atraviesa un camino asfaltado que enlaza las poblaciones de El Rocío, situada al borde la marisma del PND, y Villamanrique que se encuentra al este de la anterior, fuera de los límites de la cuenca vertiente del arroyo del Partido. Se previó que en avenidas máximas éstas podrían verter por encima del mencionado camino asfaltado.

Tras los periodos lluviosos de los años 2007-08 se comprobó que el diseño dado al Dique 1 en el verano de 2006, aunque resultaba eficiente ante avenidas extraordinarias del arroyo del Partido, no evitaba problemas menores por inundación y deposición de sedimentos en el entorno oriental de la población de El Rocío, ni solucionaba la definitiva estabilización del nuevo cono de sedimentación del arroyo formado sobre la marisma; porque los caudales normales que llegaban hasta ella aún resultaban elevados. Por otra parte, las avenidas del arroyo del Partido no causaban la inundación proyectada en el área destinada al efecto. Ante estas circunstancias, como paso previo a la ejecución de las rectificaciones necesarias en el Dique 1, se determinaron las curvas de gasto teóricas del sistema de control de las avenidas del arroyo del Partido establecido con los Diques 1 y 2.

Como en adelante se utiliza el concepto de caudal de avenida asociado al sistema de control del arroyo del Partido, se define éste por el caudal punta de avenida en la hipotética sección que agruparía a los perfiles de vertido de los Diques 1 y 2, englobando por tanto a las cuencas de los dos cauces (el arroyo del Partido y el arroyo de la Cañada del Pinar) y en la situación anterior a la laminación que experimente el sistema analizado. En la práctica se asimila con el caudal del arroyo del Partido al inicio de su primitivo cono de sedimentación, que en la fotografía superior de la Figura 1 se puede identificar por el triángulo amarillo situado en el centro de su extremo superior.

Las rectificaciones en el Dique 1 se plantearon tras el verano de 2008 y estaban operativas al inicio de 2009; con ellas: a) se modificó el perfil inicial del vertedero frontal (2006), reduciendo su superficie de de-

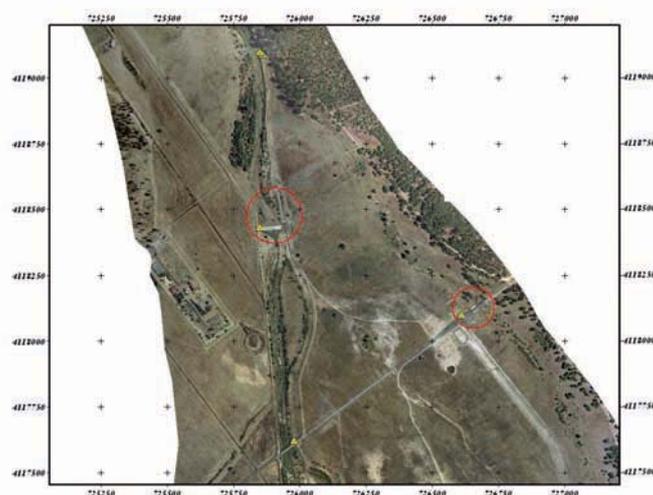


Figura 1.- Imagen superior. Superficie de inundación-laminación-sedimentación establecida con la Actuación núm. 3 sobre una fotografía aérea de 2008. El arroyo del Partido circula por la izquierda; el arroyo de la Cañada del Pinar por la derecha y el camino entre El Rocío y Villamanrique se aprecia en la parte inferior de la imagen. Las posiciones de los Diques 1 y 2 están resaltados con círculos. Los triángulos que aparecen en la figura son clavos topográficos de coordenadas conocidas, instalados durante las operaciones de nivelación efectuadas en la superficie objeto del Seguimiento y que permiten precisar la ubicación de las obras.

Imágenes inferiores: Izquierda: Dique 1 construido sobre el arroyo del Partido (2006). Derecha: Dique 2 ubicado en el arroyo de la Cañada del Pinar (2006).

sagüe y con ello el caudal de paso directo al arroyo del Partido a través del mismo y *b*) se taparon con grava los mechinales del dique, para que durante las avenidas se retrasara la descarga a través de ellos. Con estas modificaciones el nuevo perfil del vertedero frontal del Dique 1 se transformó una sección trapezoidal centrada en el lecho del arroyo de 20 m en su base, 24 m en su coronación, manteniendo los 2 m de altura; frente a los 70 m de anchura en su base que presentaba en su diseño original de 2006 (Figura 1. imagen inferior izquierda). Las avenidas de los días 1 y 5 de febrero de 2009, cuyos caudales máximos se estimaron en 85 y 70 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ respectivamente, sorprendieron; porque el empuje de la corriente en la primera avenida arrastró a la grava que taponaba a los mechinales por los huecos de éstos, dejándolos operativos (se calculó que por ellos pasó un caudal de 15 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); razón por la cual posteriormente todos los mechinales fueron taponados con hormigón a excepción del mechinal de fondo, que se ha mantenido operativo para dar continuidad al flujo en el arroyo

del Partido. La Figura 2 muestra las curvas de gasto teóricas del sistema de control de avenidas establecido con la Actuación núm. 3 en el Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en éste.

Análisis de las seis avenidas extraordinarias acaecidas en el arroyo del Partido entre el 21-12-2009 y el 4-02-2010, utilizadas de referencia en el presente estudio

Las avenidas que se analizan tuvieron lugar en las fechas siguientes: la primera el 21-12-2009; la segunda el 23-12-2009; la tercera el 28-12-2009; la cuarta el 4-01-2010; la quinta entre la noche del 13 y la madrugada del 14 de enero de 2010 y la sexta el 4-02-2010. Con anterioridad a la primera avenida estaban ejecutadas todas las rectificaciones pertinentes en el Dique 1; por tanto, las curvas teóricas de gasto en el mismo son las representadas en la Figura 2 y resumidas en la Tabla 1.

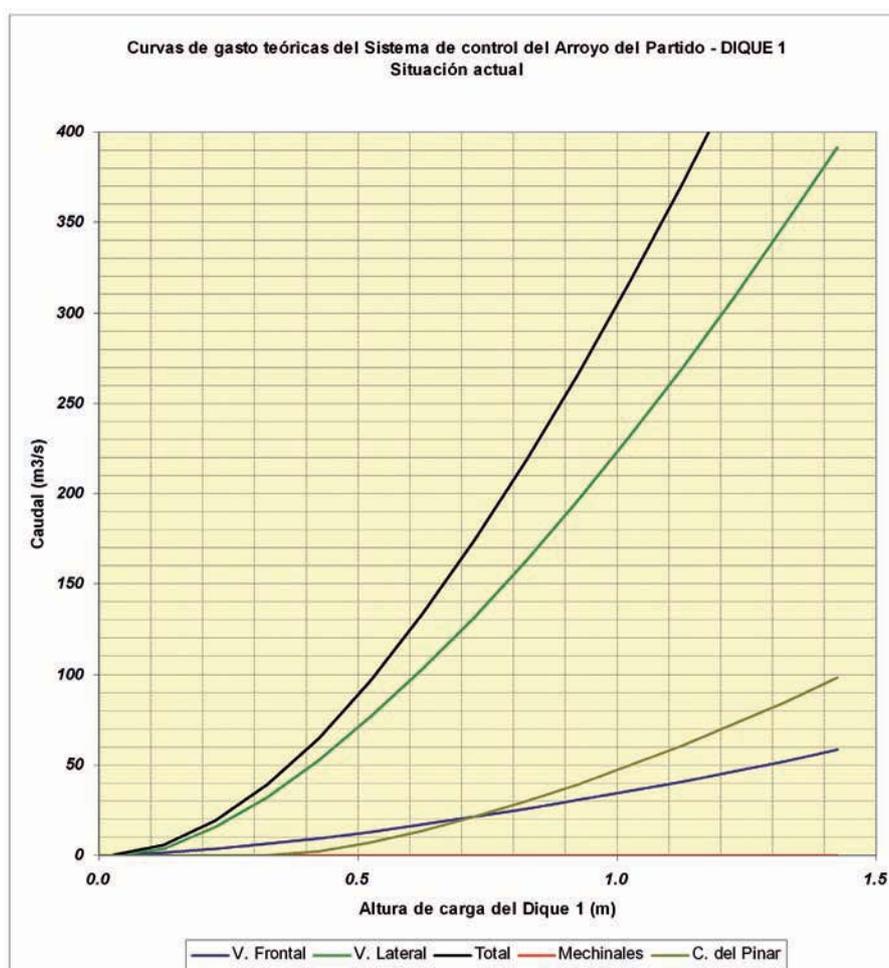


Figura 2. Distribución teórica del caudal total ($m^3 \cdot s^{-1}$) en el inicio del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido entre las diferentes secciones de vertido del Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en el mismo en 2009: Gasto por el vertedero frontal (azul); gasto por el vertedero lateral (verde); gasto total (negro); gasto a través de los mechinales (rojo); gasto por el del arroyo de la Cañada del Pinar debido a la curva de remanso formada aguas arriba del Dique 1 (verde-pardo).

Tabla 1. Distribución de los caudales de 20; 50; 100; 200 y 350 $m^3 \cdot s^{-1}$ en el 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 por el efecto de la curva de remanso formada aguas arriba de dicho dique.

Escenario propuesto en el DIQUE 1	Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Reparto de caudales por los diferentes elementos de vertido ($m^3 \cdot s^{-1}$)			
		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 2010; modificado el vertedero frontal y tapados los mechinales*.	20	*	4	16	-
	50	*	9	41	-
	100	*	13	80	7
	200	*	25	147	28
	350	*	40	253	57

(*) El vertedero de fondo del dique permanece siempre operativo con un caudal $> 0,20 m^3 \cdot s^{-1}$.

Para analizar el comportamiento de las avenidas, se realizaron las operaciones siguientes:

- Se simularon los caudales de avenida de los seis eventos acaecidos en el arroyo del Partido, en función de las condiciones hidrológicas de su cuenca y de las precipitaciones habidas en ella en las horas previas a su aparición, utilizando el modelo hidrológico HEC-HMS (2009).
- Para la aplicación del modelo HEC-HMS se identificó la precipitación de la cuenca con la registrada en la estación de Bollullos, situada en el centro de la misma. Esta hipótesis sólo es fiable, cuando se trata de una precipitación generalizada en toda la cuenca; lo que en el caso de los eventos analizados se puede asumir en una primera aproximación, pues se trata de precipitaciones torrenciales extraordinarias.
- En la Figura 3 aparecen en granate las precipitaciones habidas en la estación de Bollullos en los periodos analizados y se muestran las simulaciones realizadas de los caudales de avenida del arroyo del Partido asociadas a ellas en azul y verde. Las diferencias entre ambas simulaciones se deben a los diferentes valores aplicados a los tiempos de concentración de las avenidas.
- Para estimar el tiempo de concentración se utilizó la ecuación propuesta por el USDA-

SCS, por considerar la expresión que mejor responde a las características morfológicas y edáficas de la cuenca del arroyo del Partido, que presenta suelos profundos y permeables; ya que introduce en su cálculo, además de la longitud L y la pendiente J del cauce principal, el valor del Número de Curva medio de la cuenca

$$t_c = 0,071 \left(\frac{L^{0,8}}{J^{0,25}} \right) \cdot \left(\frac{1000}{NC - 9} \right)^{0,7}$$

Posteriormente los valores obtenidos con dicha ecuación, se multiplicaron por un factor de reducción para adecuarlos a los valores de las 17 mediciones disponibles (Tabla 2). Se realizaron dos aproximaciones, utilizando como factores de reducción 0,50 (simulación en azul en la Figura 3) y 0,75 (simulación en verde en la Figura 3)

En la misma Figura 3 se muestran los valores de las 17 mediciones disponibles (con un círculo rojo para las mediciones realizadas sobre fotografías y con un triángulo amarillo para las mediciones directas en el vertedero) junto con las simulaciones realizadas.

La fiabilidad de los resultados de cualquier modelo necesita del aforo de los caudales obtenidos. Para las situaciones analizadas sólo se dispuso de los diecisiete valores puntuales de la Tabla 2, que utilizan la altura de carga en el vertedero frontal del Dique 1 para distintos momentos del tránsito de las avenidas por

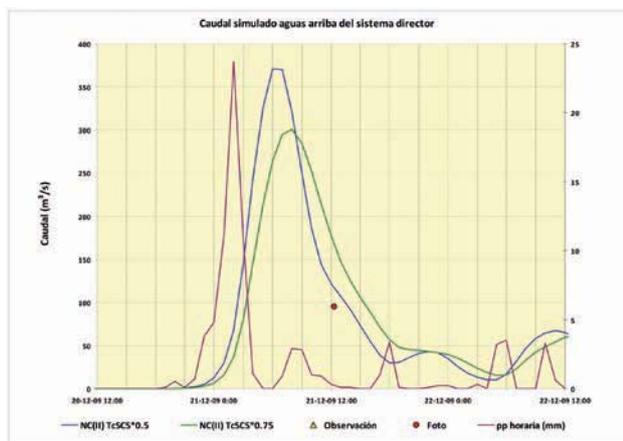
Tabla 2. Caudales que vierten por las diferentes secciones de la estructura de control definida con el Dique 1, establecidos a partir de la altura de carga en su vertedero frontal, obtenida por medición en el umbral de dicho vertedero: directa (observación) o a través de fotografía (fotog.).

Fecha y hora	Observación	H. vertido	Q. VF+Mech.	Q. D1	Q. D1+CP	Q. D2
05/01/2010 10:30	1,72	0,28	5,2	29,5	29,5	24,2
14/01/2010 10:00	1,85	0,15	2,2	8,2	8,2	6,0
15/01/2010 10:00	2,00	0,00	0,2	0,2	0,2	0,0
04/02/2010 8:00	1,22	0,78	23,7	172,5	198,2	174,5
04/02/2010 11:00	1,30	0,70	20,2	144,6	163,8	143,5
04/02/2010 18:51	1,84	0,16	2,4	9,5	9,5	7,1
05/02/2010 12:45	1,80	0,20	3,2	15,2	15,2	12,0
Fecha y hora	Fotog.	H. vertido	Q. VF+Mech.	Q. D1	Q. D1+CP	Q. D2
21/12/2009 13:20	1,48	0,52	13,0	88,2	95,2	82,2
22/12/2009 13:22	1,90	0,10	1,2	3,2	3,2	1,9
24/12/2009 13:12	1,68	0,32	6,4	37,7	37,7	31,4
04/01/2010 12:45	1,14	0,86	27,5	202,0	234,9	207,4
05/01/2010 11:05	1,78	0,22	3,7	18,5	18,5	14,8
14/01/2010 12:32	1,88	0,12	1,6	4,9	4,9	3,3
15/01/2010 12:45	2,04	-0,04	0,2	0,2	0,2	0,0
04/02/2010 11:56	1,51	0,49	11,9	79,8	85,2	73,3
04/02/2010 18:41	1,80	0,20	3,2	15,2	15,2	12,0
05/02/2010 13:39	1,84	0,16	2,4	9,5	9,5	7,1

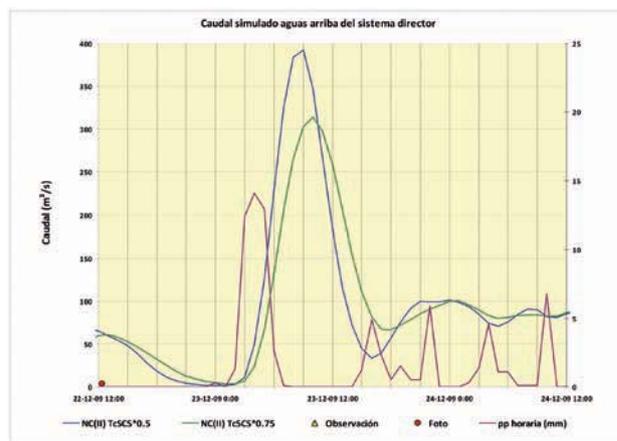
Notaciones: H. vertido, Altura de carga en el vertedero; Q. VF+ Mech, Caudal que pasa por el vertedero Frontal + Mecinales; Q. D1, Caudal acumulado aguas arriba del Dique 1; Q.D1+CP, Caudal total; Q.D2, Caudal que pasa al arroyo de la Cañada del Pinar.

el mismo. Estos valores se obtuvieron de dos maneras: a) por medición directa inmediatamente aguas arriba del umbral del vertedero (siete valores); b) a

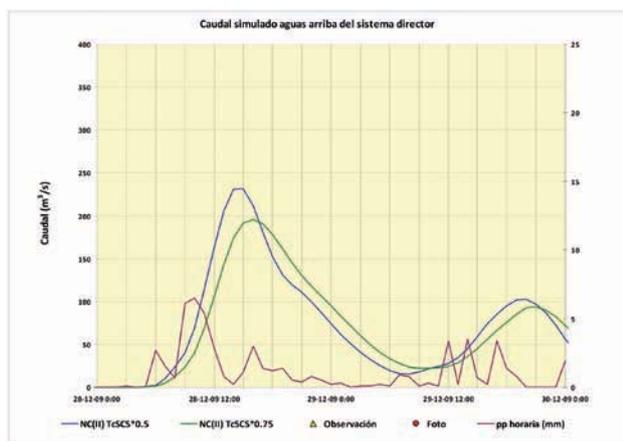
través de su medición sobre las fotografías del paso de la lámina de agua por el mismo (diez valores). La Figura 4 detalla el uso de las fotografías para la



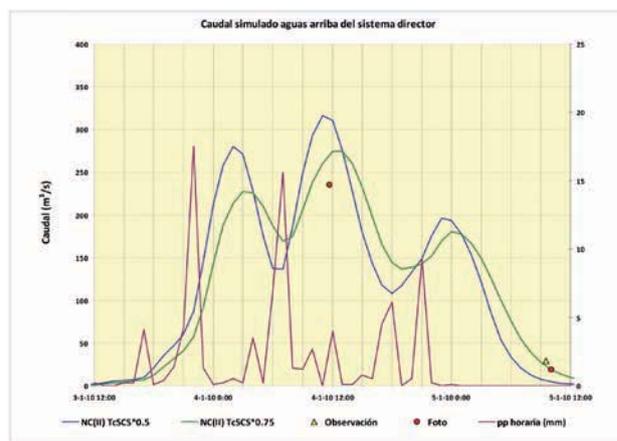
Avenida del 21-12-2009.



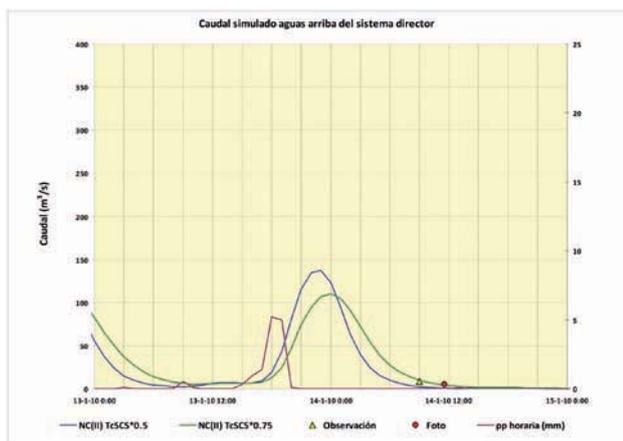
Avenida del 23-12-2009.



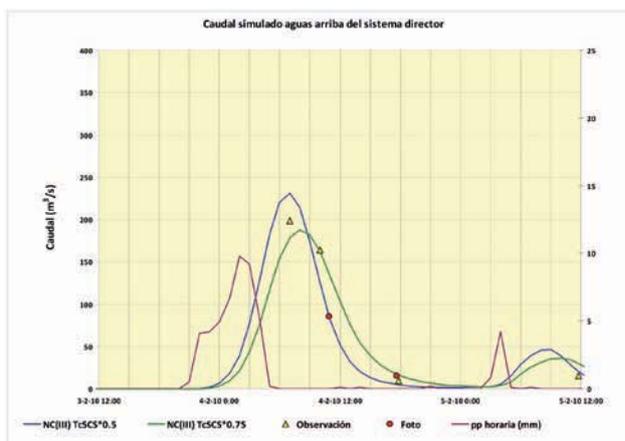
Avenida del 28-12-2009



Avenida del 4-01-2010



Avenida del 13-01-2010



Avenida del 4-02-2010.

Figura 3. Precipitaciones torrenciales en la estación de Bollullos (mm) en los eventos considerados (granate) y simulación de los caudales de avenida ($m^3 \cdot s^{-1}$) en el arroyo del Partido para el sistema de control establecido en el mismo con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, en las condiciones que se especifican de NC y tc (Para tc *0,50, azul; para tc *0,75, verde). Mediciones de la altura de carga en el vertedero frontal del Dique 1: obtenido de forma directa, triángulo amarillo; obtenido mediante el método fotográfico, círculo rojo.

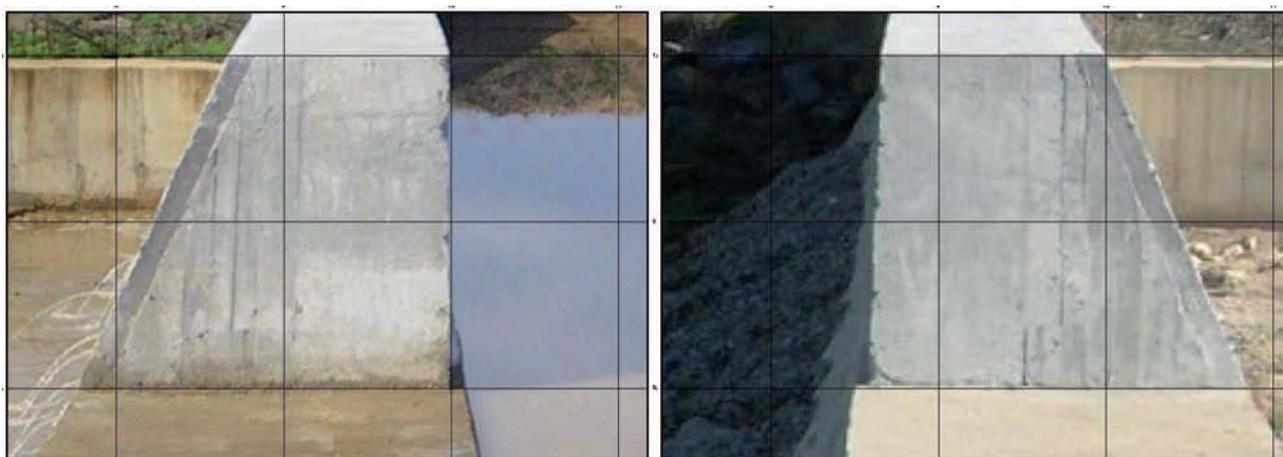


Figura 4. Fotografías que muestran las paredes interiores del vertedero frontal del Dique 1, visto desde el margen izquierdo hacia el derecho (imagen izquierda) y visto desde el margen derecho hacia el izquierdo (imagen derecha). En ellas aparecen dos cuadrados ajustados desde el umbral del vertedero hasta su coronación. Cada cuadrado tiene 1 m de lado y sobre ellos se representa el vertido de la lámina de agua procedente de la fotografía del paso del flujo por el umbral del vertedero.

Tabla 3. Características de las seis avenidas sintéticas adoptadas para conocer la respuesta la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en los cuatro parajes seleccionados en este estudio.

TORMENTA	HORA inicial	HORA final	P (mm)	I_{\max} (mm/h)	$t_{p(t)}$ (Fecha y hora)	q_p (m^3/s)
21/12/2009	20-12-09 19:00	21-12-09 6:00	56,9	23,7	21-12-09 7:00	332
23/12/2009	22-12-09 23:00	23-12-09 7:00	43,7	14,1	23-12-09 9:00	347
28/12/2009	28-12-09 2:00	28-12-09 13:00	26,6	6,5	28-12-09 15:00	212
04/01/2009	3-1-10 9:00	4-1-10 11:00	62,4	17,5	4-1-10 12:00	292
14/01/2009	13-1-10 14:00	13-1-10 20:00	12,9	5,2	13-1-10 23:00	122
04/02/2009	3-2-10 20:00	4-2-10 5:00	44,7	9,8	4-2-10 7:00	205

Notaciones: Columna 1: Fecha de la avenida; columnas 2 y 3: Hora inicial y final (solares) de la precipitación torrencial previa a la avenida; columna 4: Precipitación anterior a la avenida: P (mm); columna 5: Intensidad máxima de la precipitación de avenida: I_{\max} (mm/h); columna 6: Tiempo al pico del hidrograma de avenida (fecha y hora solar) y columna 7: Caudal punta de la avenida: q_p ($m^3 \cdot s^{-1}$).

obtención del caudal de paso por el vertedero frontal del Dique 1.

También se utilizó en el análisis de las avenidas, el comportamiento hidráulico del tirante de su corriente a su paso por la sección badén-puente del Ajolí, situado al inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido, cerca de la población de El Rocío, utilizando para ello el programa de circulación del flujo en cauces abiertos HEC-RAS (2008).

Para centrar el análisis del funcionamiento de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en los diferentes parajes que podrían resultar más afectados por ella con las avenidas seleccionadas, se optó por establecer unos caudales sintéticos para éstas; que se definieron por el valor medio de las dos simulaciones de caudales representadas en la Figura 3 para cada avenida. Las principales características de

estas avenidas sintéticas utilizadas en el estudio se resumen en la Tabla 3.

RESULTADOS

Analizadas las avenidas, se procedió a estudiar sus efectos en los lugares donde el impacto de lo proyectado debía ser más relevante o donde, de acuerdo con sus características físicas, podría resultar más vulnerable. En síntesis se estudiaron los siguientes parajes:

- En la sección donde se ubica el Dique 1 (en el arroyo del Partido).
- En el área de inundación-laminación-sedimentación destinada para este fin entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005.

- c. En la sección donde se sitúa el Dique 2 (en arroyo de la Cañada del Pinar) y
- d. En la sección badén-puente del Ajolí (inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido) y en la superficie situada al este de una mota o pequeño dique de protección construida para defender a la aldea de El Rocío de las avenidas del arroyo del Partido.



Figura 5. Reparto del caudal de avenida de 234,9 m³·s⁻¹ en el Dique 1 construido sobre el arroyo del Partido a las 12:50 horas locales del día 4-01-2010. Se estima que en dicho momento pasan por el vertedero frontal al arroyo del Partido 27,5 m³·s⁻¹; por el vertedero lateral hacia la superficie de inundación 174,5 m³·s⁻¹ y los restantes 32,9 m³·s⁻¹ se desvían hacia el arroyo de la Cañada del Pinar por la curva de remanso generada aguas arriba del paramento frontal del Dique 1.

Sección donde se ubica el Dique 1 en el arroyo del Partido

El sistema de distribución de los caudales de avenida entre los vertederos frontal y lateral del Dique 1 funcionó de acuerdo con lo proyectado en las seis avenidas analizadas (en la imagen de la Figura 5 aparece dicho reparto para la avenida del 4-01-2010 a las 12:50 horas locales). En ningún caso los caudales que continuaron por el arroyo del Partido aguas abajo de su vertedero frontal superaron los 40 m³·s⁻¹ previsto con el sistema de control (Tabla 1). El único problema detectado en el comportamiento de esta estructura de regulación de las avenidas, se debió a que los sucesivos flujos de avenida se concentraron en el extremo izquierdo del paramento frontal del Dique 1, lo que causó que sus corrientes erosionaran el empotramiento lateral del mismo que, al



Figura 6. Inundación causada por la avenida del arroyo del Partido del 4-01-2010 a las 12:49 horas locales en la superficie destinada al efecto con la Actuación núm. 3, aguas arriba del camino asfaltado entre las poblaciones de El Rocío y Villamanrique, que se ubica al fondo de la imagen.

ser de arena, resultó muy vulnerable. Tras la avenida del 14-01-2010 se consideró de la zona erosionada necesitaba un relleno urgente de arena, que fue realizada en los días siguientes; lo que permitió al sistema continuar funcionando según lo proyectado.

Área de inundación-laminación-sedimentación destinada como tal en la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 y ubicada entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar

La parte de esta superficie ubicada aguas arriba del camino asfaltado entre las poblaciones de El Rocío y Villamanrique (Figura 1, imagen superior) funcionó de acuerdo con lo proyectado en la Actuación núm. 3; aunque debido a la textura arenosa y muy permeable el terreno, éste tardó en saturarse y solo a partir de la avenida del 4-01-2010 la inundación resultó manifiesta y extensiva como se muestra en la Figura 6.

Aguas abajo del citado camino asfaltado el esquema proyectado se alteró en la primera avenida, la del 21-12-2009, al desbordar ésta un muro de tierra construido en el margen izquierdo del Dique 2 situado sobre el arroyo de la Cañada del Pinar. Ello ocasionó que al llegar los caudales de avenida a la sección donde se ubica el Dique 2, derivaran por gravedad hacia el paso generado por el desbordamiento en el muro de tierra, en lugar de atravesar su vertedero. Posteriormente los caudales de avenida se concentraron nuevamente en el cauce del arroyo de la Cañada del Pinar, como se explica en el apartado siguiente, que detalla el accidente comentado y sus consecuencias.

Sección donde se sitúa el Dique 2 en arroyo de la Cañada del Pinar

Se ha comentado que las misiones del Dique 2 son las de mantener el régimen subcrítico aguas arriba del mismo y regular el caudal vertiente directo al arroyo de la Cañada del Pinar, asegurando con ello la expansión de las avenidas por el área de inun-

dación, lo que en situaciones de avenidas máximas debe causar la inundación de la superficie destinada al efecto situada aguas abajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique. La presencia a la izquierda del Dique 2 de un paso de fauna, motivó que para mantenerlo operativo se construyera un muro de tierra protegiendo al mismo y encauzando a las corrientes de avenida hacia el vertedero del citado dique.



Figura 7. Secuencia de imágenes de la avenida del 24-12-2009 que muestran de izquierda a derecha: a) el muro de tierra situado en el margen izquierdo del Dique 2; b) el tránsito de la corriente de avenida hacia la sección del paso de fauna y c) la salida del flujo de avenida del paso de fauna, para dirigirse al cauce del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2.

Sin embargo, dicho muro de tierra fue desbordado en su extremo más oriental en la primera avenida y la mayor parte de su corriente se desvió por el hueco del desbordamiento en lugar de dirigirse al vertedero del Dique 2, para atravesar posteriormente el paso de fauna, como se aprecia en la secuencia de imá-

genes de la Figura 7. En las tres primeras avenidas esta cuestión no llegó a tener mayor trascendencia; pues sus flujos, tras atravesar el paso de fauna, desembocaron nuevamente en el cauce de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2; por tanto, no se alteró en esencia el esquema de la Actuación



Figura 8. Corte del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique por la corriente de la avenida del 4-01-2010 en la sección donde se situaba el paso de fauna, en el margen izquierdo del arroyo de la Cañada del Pinar, al este del Dique 2 y muy próximo a su ubicación. Izquierda: Detalle del corte del camino asfaltado. Derecha: Panorámica de la situación.

núm. 3, ya que lo proyectado era que finalmente las avenidas afluyeran al arroyo de la Cañada del Pinar y, a partir de él, al cauce del Caño Mayor, para desde este curso desembocar en la marisma del PND en un entorno diferente al de la marisma de El Rocío, pero que era precisamente en el que tenía lugar con anterioridad a 1981. En cualquier caso, esta alteración contribuyó a que la corriente adquiriese una velocidad superior a la que hubiera adquirido, si se hubiera expandido por la superficie de inundación situada aguas abajo del citado camino asfaltado.

Pero la corriente de la avenida del 4-01-2010 arrastró la estructura de hormigón cuadrangular que constituía el paso de fauna y cortó el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique en dicha sección (Figura 8). Este efecto tuvo repercusiones negativas

para el normal desarrollo de la vida y la economía de la zona; pero desde el punto de vista de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 en este paraje, no supuso una nueva alteración respecto a los ya producidos con las avenidas precedentes. En cualquier caso las previsiones de la Actuación núm. 3 en el lugar quedaron alteradas.

Sección del badén-puente del Ajolí (inicio del nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido) y superficie situada al este de una mota o pequeño dique de protección construida para defender a la aldea de El Rocío de las avenidas del arroyo del Partido

Este paraje constituye el objetivo principal del sistema de protección de la Actuación núm. 3 del Proyecto



Figura 9. Izquierda: Tránsito de la avenida del arroyo del Partido del 21-12-2009 por la cañada real a las 11:42 horas locales, cerca de la aldea de El Rocío. Derecha: El arroyo del Partido inmediatamente aguas abajo del puente del Ajolí a las 12:21 horas locales del día 5-02-2010.

El cauce que aparece a la derecha en esta imagen es el que actualmente se encuentra operativo desde el invierno del año 1997; en que el cauce primitivo, que corresponde al de la izquierda, quedó aterrado por los sedimentos transportados por las avenidas hasta este lugar, dejándolo no operativo. El nivel de agua que aparece en la imagen sobre el cauce izquierdo, responde únicamente a una elevación del calado del agua causado por la avenida del día anterior.

Doñana 2005. La imagen de las avenidas del arroyo del Partido circulando por la cañada real¹ se repitió en cinco de las seis avenidas analizadas (Figura 9, imagen de la izquierda). Sin embargo, estas inundaciones no han tenido ni el impacto ni la repercusión que tuvieron las avenidas que llegaron hasta la sección del Ajolí² en años siguientes al encauzamiento del arroyo del Partido (1981) hasta la instalación y rectificación del sistema de control de avenidas en el mismo (2009).

Antes de su encauzamiento, por la sección del Ajolí circulaba el canal de desagüe del primitivo cono de sedimentación del arroyo del Partido; que funcionaba como un caño marismeño y era conocido como caño Ajolí. Los caños presentan una escisión central pronunciada y amplias superficies laterales de inundación para el caso de avenidas, esta descripción se ha podido reconstruir estudiando tramos del arroyo no alterados (Urdiales, 1996; Mintegui et al., 2003). En el caso del caño Ajolí en el paraje en cuestión, la escisión central se estima que podía transportar un máximo entre 4 a 5 m³-s-1; el resto de la avenida, que por la morfología del lugar podría alcanzar entre cuatro o cinco veces este valor en situaciones extremas, inundaba las superficies colindantes (Mintegui et al., 2010). Pero el encauzamiento del arroyo del Partido (1981) provocó que sus avenidas condujeran todo su caudal (de valores similares a los que se analizan en esta ocasión, del orden de 200 m³-s-1 o superiores) hasta su sección final, ubicada a poca distancia aguas arriba del puente del Ajolí. Dichos caudales atravesaban previamente siete Km. de canalización, en los que erosionaban por abrasión tanto el lecho como los márgenes del encauzamiento; por

tanto, venían cargados de sedimentos. Al encontrar el flujo libertad para expansionarse aguas abajo de la sección del Ajolí, se iniciaba allí mismo el depósito de los sedimentos que transportaba la corriente y de este modo se formó el nuevo cono de sedimentación del arroyo del Partido sobre la marisma de El Rocío.

A partir de la construcción del Dique 1 en el arroyo del Partido en el verano de 2006, los caudales que llegaban hasta la sección del badén-puente del Ajolí comenzaron a disminuir y el arroyo del Partido fue adquiriendo de nuevo la fisonomía de caño en dicho paraje (Figura 9, imagen de la derecha), proceso que se reforzó tras las rectificaciones realizadas en el Dique 1 en 2009.

El nuevo cono de sedimentación, formado aguas abajo de la sección del Ajolí, supuso serios problemas en el entorno de la aldea de El Rocío, tanto ecológicos como hidráulicos, motivados por los efectos torrenciales de las avenidas ocurridas entre los años 1981-2008, especialmente por las que tuvieron lugar en el trienio 1995-98. Se citan los más importantes: a) la desaparición de 4,3 Km² de superficie de marisma por la deposición de 4,48 millones de m³ de arena sobre ella; b) La elevación de la cota de la solera por la que actualmente circula el tramo final del arroyo del Partido antes de afluir en la zona inundada de la marisma, como consecuencia del depósito de los sedimentos aportados por sus propias avenidas sobre su propio lecho; que condicionó, además, a la pendiente del lugar hacia el oeste, es decir, hacia la zona urbanizada de la aldea de El Rocío; motivo por el cual los técnicos responsables de la seguridad del lugar construyeron una mota o pequeño muro de protección en el límite oriental de la citada aldea en el invierno de 1997, para protegerla de las futuras avenidas del arroyo del Partido, como se observa a la izquierda de la imagen de la Figura 10.

La situación del paraje que se comenta al comienzo del invierno del año hidrológico 2009-10 era prácticamente similar a la que se muestra en la imagen

¹ Camino tradicional no asfaltado que conduce a la ermita de El Rocío, de alto contenido socio-cultural y religioso en la región.

² Tramo del citado camino tradicional que es atravesado por el cauce del arroyo del Partido. Ha dispuesto siempre de un puente y, desde el comienzo de este siglo, también tiene un badén.

de la Figura 10, obtenida en agosto de 2008. En ella se distingue: a) el arroyo del Partido, convertido en caño, que dirige su corriente desde la sección del badén-puente del Ajolí (extremo superior derecho de la imagen) hacia el oeste para desembocar en la marisma (extremo izquierdo de la imagen); b) la confluencia del caño Marín en el arroyo del Partido en el centro de la imagen; el caño Marín es el encargado de recoger los caudales de drenaje de las áreas de cultivo situadas a la derecha del arroyo del Partido y, por tanto, procede del oeste (extremo superior izquierdo de la imagen); c) el citado muro de protección del límite oriental de la aldea de El Rocío, a la izquierda de la fotografía y d) la cañada real en el extremo superior de la imagen, desde el puente del Ajolí (derecha) hasta el puente sobre el caño Marín (izquierda).

Debido a la dirección este-oeste de la pendiente del terreno en el paraje que se comenta, si el caudal líquido del arroyo del Partido alcanzase la capacidad suficiente para arrastrar sedimentos, como ocurría en el pasado; podría reactivarse el cono de sedimentación del arroyo del Partido, expandir su abanico aluvial hacia el oeste y llenar de sedimentos el espacio comprendido entre el cauce actual del arroyo del Partido en el paraje en cuestión y el pequeño muro

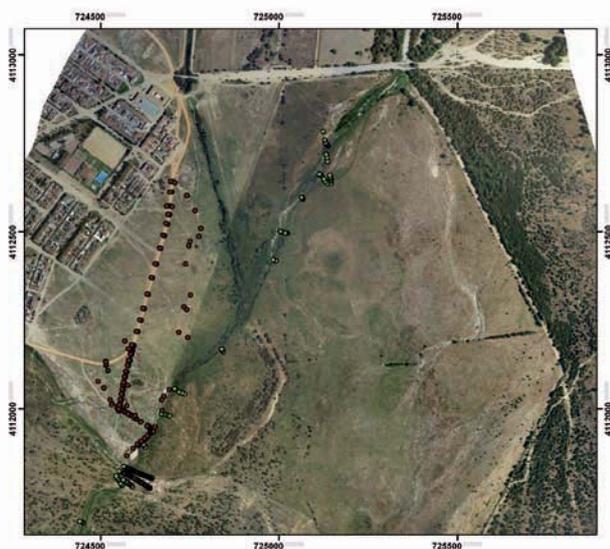


Figura 10. Recorrido del arroyo del Partido al este del muro de protección de la aldea de El Rocío, que se ve a la izquierda en la fotografía tomada en 2008, desde la sección badén-puente del Ajolí al noreste (derecha) y la estación de bombeo de la aldea de El Rocío próxima a la marisma del PND al suroeste (izquierda). En la imagen se distingue también la confluencia en el arroyo del Partido del caño Marín en el centro de la imagen y el trazado la cañada real desde el puente del Ajolí (derecha) hasta el puente sobre el caño Marín (izquierda), en el extremo superior de la imagen. Los puntos de la imagen corresponden a levantamientos topográficos realizados en 2007 (marrón) y 2008 (verde).

protección que defiende a la aldea de El Rocío por su lado este; lo que, en el caso de producirse precipitaciones torrenciales en la zona, podría causar en el futuro graves problemas para el drenaje al área urbanizada de la aldea de El Rocío. El propósito de la construcción del Dique 1 en el arroyo del Partido en el verano de 2006 y su posterior rectificación en el 2009 fue reducir el caudal de avenida que pudiera llegar hasta la sección del badén-puente del Ajolí, para disminuir su tirante e impedir que la corriente adquiriese la capacidad suficiente para arrastrar sedimentos. Los puntos en marrón y verde que aparecen sobre la fotografía corresponden a dos levantamientos topográficos realizados en la zona. El primero (puntos marrones) se llevó a cabo en el 2007 para analizar el efecto del muro de protección de la aldea de El Rocío ante diferentes avenidas del arroyo del Partido. El segundo (puntos verdes) en el 2008 para detectar las alteraciones morfológicas sufridas por el arroyo del Partido a partir de 2006. En el extremo inferior izquierdo de la imagen aparece una acumulación de puntos verdes, que pertenecen a secciones del arroyo del Partido a su entrada en el PND, a poca distancia de su afluencia en la marisma.

A continuación se analiza el comportamiento de las seis avenidas de este estudio en el paraje que se comenta. Al respecto se comprobó que:

- Mientras el caudal de avenida del arroyo del Partido asociado a su sistema de control no supere los $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, la corriente que descarga por el verterlo frontal del Dique 1 hacia el arroyo del Partido circulará por su cauce actual hasta la marisma, sin que en principio tengan lugar fenómenos de carácter geo-torrencial (es decir, de erosión, transporte y sedimentación) en su recorrido; pues se prevé que el caudal que llegue hasta la sección badén-puente del Ajolí será menor de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y, por tanto, circulará por el cauce que abrió el propio arroyo en el invierno de 1997 aguas abajo del puente (cauce de la derecha de la imagen derecha de la Figura 9).
- Cuando el caudal de avenida supere los $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, debido a las condiciones hidráulicas que se dan inmediatamente aguas arriba de la sección del badén-puente del Ajolí, en las que incide directamente la topografía del lugar y el propio puente; aunque la corriente continúe circulando hacia la marisma por el cauce abierto por ésta aguas abajo del puente del Ajolí en el invierno de 1997, a partir de un caudal de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ la avenida deriva una parte de su corriente a la cañada real. Este efecto se ha comprobado aplicando el programa informático HEC-RAS (2008) al movimiento de la corriente en el tramo comprendido entre una sección situada inmediatamente aguas arriba del badén y otra sección ubicada inmediatamente aguas abajo del puente del Ajolí. La fotografía de la izquierda de la Figura 11

muestra en planta al arroyo del Partido en el paraje en cuestión y la Figura 12 el resultado de la aplicación del programa HEC-RAS en la misma.

- c. El caudal de avenida del arroyo del Partido que en la sección badén-puente del Ajolí derive hacia la cañada real, circulará por ésta aprovechando la pendiente del terreno en el lugar hasta confluir con el caño Marín. Una parte de la corriente de ambos cursos se dirige hacia la zona inundada de la marisma por el cauce del arroyo del Partido en el lugar; pero otra se almacena en la llanura situada al este de la mota de protección de la aldea de El Rocío, provocando en ella una inundación; que en principio no es causa de problemas importantes, porque el agua que llega hasta el lugar no arrastra arenas y puede ir evacuando poco a poco hacia la marisma.
- d. Pero si la inundación se prolonga durante mucho tiempo, el agua que se concentra en las cotas más bajas del terreno, siguiendo la microtopografía del lugar o aprovechando movimientos del terreno efectuados anteriormente en la zona, puede abrir nuevos derramaderos; como el señalado en rojo en la imagen de la derecha de la Figura 11, que ha generado una nueva vía de agua hacia la marisma representada con una flecha azul en la misma imagen. Si estos derramaderos permanecen aislados, su efecto es reducido; pero si alguno de ellos provoca una erosión remontante que enlace con el cauce actual del arroyo del Partido en el paraje en cuestión; el arroyo (que es el eje del cono de sedimentación) se desviará adoptando la dirección del nuevo derramade-

ro hacia el oeste. Esto causaría la activación del cono y generaría un nuevo problema, porque dirigiría todo el volumen de agua hacia el oeste sobre el área urbanizada de la aldea de El Rocío, elevando la cota de inundación y creando dificultades para el drenaje del área urbanizada en el lugar. Para evitar este problema, se recomienda mantener con una cota suficiente y uniforme las motas principales que se disponen en el zona (mota de protección de la aldea de El Rocío, prolongación de la misma en dirección a la marisma y mota-camino que partiendo de la última se dirige hacia la estación de bombeo de El Rocío; aunque sin poner otros obstáculos a la circulación de las avenidas.

CONCLUSIONES

Se resume el comportamiento de las obras y disposiciones adoptadas con la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005 ante las avenidas ocurridas en el arroyo del Partido entre el 20-12-2009 y el 5-02-2010; señalando: a) los aspectos de la Actuación núm. 3 que han funcionado de acuerdo con lo previsto y que han servido para evitar problemas graves de inundación y aterramiento en el entorno de la aldea de El Rocío y para planificar el futuro de esta zona; b) los problemas que han causado los comportamientos no previstos de la Actuación núm. 3 y que, siguiendo el esquema corrector de los cursos torrenciales, deben ser objeto de revisión y rectificación; como ha sido el criterio mantenido hasta la fecha; c) los problemas que no se previeron, pero entran dentro de la lógica que pudieran ocurrir tratándose



Figura 11. Izquierda: Paraje del badén-puente del Ajolí con la cañada real en el centro de la imagen tomada en 2008. El flujo circula de norte a sur y el cauce operativo del arroyo del Partido aguas abajo de la cañada real es el de la izquierda que se dirige al oeste. Los puntos amarillos en la imagen corresponden a un levantamiento topográfico realizado en 2009. Derecha: Recorrido del arroyo del Partido próximo a su afluencia en la marisma del PND, en su margen derecho se ve la estación de bombeo de El Rocío y más al oeste se señala el lugar donde se produjo un nuevo derramadero durante las avenidas de 2010 (en rojo) y la dirección de la corriente en el mismo (en azul).

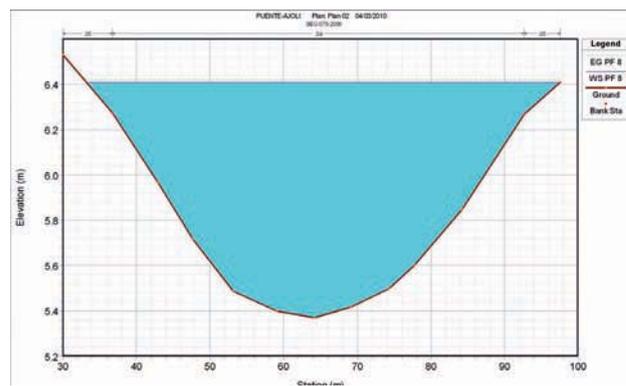
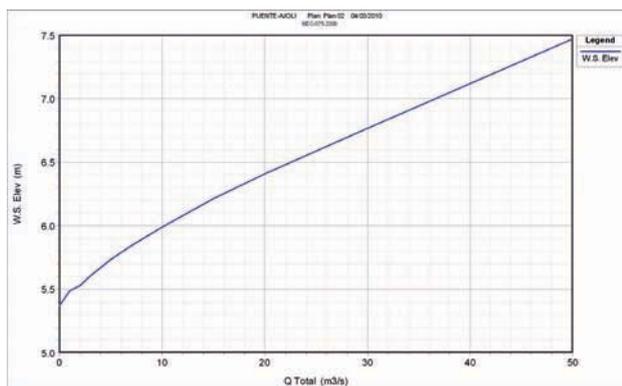
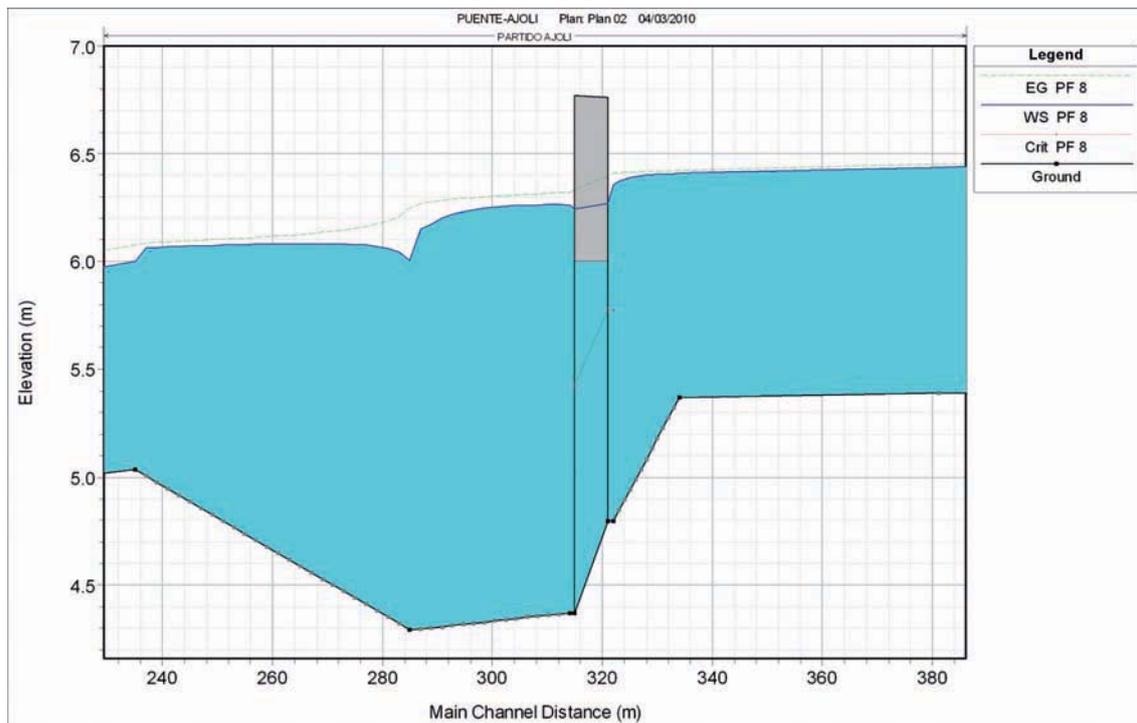


Figura 12. Esquema superior: Perfil de la representación en HEC-RAS del paso del flujo del arroyo del Partido por el tramo comprendido entre el badén y el puente en la sección del Ajolí para una avenida de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, a partir de la cual una parte del flujo del arroyo del Partido deriva hacia la cañada real, siguiendo el gradiente del terreno en el lugar. Esquemas inferiores: Izquierda: Curva de gasto en la sección badén-puente del Ajolí. Se observa que la cota del terreno para un caudal de avenida de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ es 6,4 m. Derecha: Sección del badén del Ajolí para el caudal de $20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

de cursos torrenciales en un medio altamente vulnerable.

Ha funcionado de acuerdo a lo previsto:

a. El reparto de los caudales de avenida entre los vertederos frontal y lateral del Dique 1, tras las rectificaciones efectuadas en el mismo en el 2009; lo que ha propiciado que los caudales que han llegado hasta la sección badén-puente del Ajolí funcionasen de acuerdo con lo establecido en el sistema de control de avenidas del arroyo del Partido (Tabla 1), no superando en dicha sección, incluso para los caudales de avenida más elevados, el orden de los $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ que aparece en ella.

b. Los caudales que han llegado hasta la sección badén-puente del Ajolí, incluso los más elevados, no han presentado la capacidad de arrastre de arenas que tuvieron las avenidas que llegaron hasta ella antes de la construcción y rectificación del Dique 1, lo que ha evitado una elevación de la cota del terreno por deposición de arenas en la superficie situada al este de la aldea de El Rocío (en concreto al este de la mota de protección de la aldea de El Rocío), manteniéndose las posibilidades actuales de drenaje del área urbanizada de El Rocío en dicho paraje, al conservarse en la práctica su relieve

- c. Se ha comprobado en un reconocimiento realizado sobre el terreno en julio de este año 2010, que los caudales de avenida del arroyo del Partido derivados hacia el arroyo de la Cañada del Pinar y desde éste al Caño Mayor, para descargar finalmente en la marisma del PND en un paraje diferente al del entorno de la aldea de El Rocío, que, aunque han causado inundaciones en las zonas de menor cota que han encontrado en su recorrido, no han producido arrastres significativos de arenas ni el depósito de las mismas. Ello se debe básicamente a que tanto el arroyo de la Cañada del Pinar como el Caño Mayor mantienen en la mayor parte de su recorrido su morfología natural original, que permite expansionar a las avenidas durante el tránsito por ellos.
- d. La opción de reducir el caudal de las avenidas del arroyo del Partido que llegan hasta la sección del badén-puente del Ajolí, a costa de derivar la mayor parte del caudal de dichas avenidas hacia el Caño Mayor, es un retorno al funcionamiento del sistema hidrológico-sedimentario de la zona anterior al encauzamiento del arroyo del Partido en 1981, que lo avala tanto la morfología del terreno en el lugar como la ecuación de continuidad. La única diferencia respecto del pasado está en el grado de expansión de las avenidas del arroyo del Partido en el paraje comprendido entre el emplazamiento del Dique 1 y la sección anterior al Ajolí (que constituye una parte de su antiguo cono de sedimentación) y en el tiempo de duración de dicha expansión, que condiciona la velocidad de incorporación de las avenidas del arroyo del Partido en el arroyo de la Cañada del Pinar.
- b. En la zona norte de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación de las avenidas del arroyo del Partido el esquema operativo funcionó de acuerdo con lo previsto; pero no ocurrió lo mismo en la zona sur, donde la primera avenida del arroyo, del día 21-12-2009, el agua embalsada aguas arriba del Dique 2 desbordó el muro de tierra ubicado en el margen izquierdo del arroyo de la Cañada del Pinar, construido para encauzar a la corriente hacia el vertedero de dicho dique, lo que impidió que el caudal de avenida se repartiera según lo establecido en la Actuación núm. 3. Por ello, la corriente no llegó a verter por encima del camino asfaltado, sino que en su mayor parte, tras desbordar el muro, derivó por gravedad hacia un paso de fauna situado por debajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique, ubicado al este del Dique 2 y próximo a él. Tras atravesar el paso de fauna, la corriente retomó el cauce natural del arroyo de la Cañada del Pinar aguas abajo del Dique 2. El citado muro de tierra se realizó para mantener la funcionalidad del paso de fauna.
- c. Durante las avenidas siguientes la corriente terminó cortando el camino asfaltado en la sección donde se ubicaba el paso de fauna; lo que motivó que prácticamente todas las avenidas del arroyo del Partido incorporadas al cauce del arroyo de la Cañada del Pinar aguas arriba del Dique 2 pasaran directamente por gravedad a la sección cortada del camino asfaltado, dejando de ser operativo el vertedero del Dique 2. Sin embargo, en avenidas importantes como las del 4-01-2010 y 4-02-2010 se observó la existencia de un efecto de embalse en el paraje aguas arriba del Dique 2 y de lo que quedaba de la estructura del muro de tierra situado en su margen izquierdo, que se mantuvo lo bastante rígida como para funcionar como un elemento de retención y/o de vertido de la corriente de la avenida; consiguiendo con ello un moderado laminado de la avenida, o manteniendo algo del efecto que estaba previsto con la Actuación núm. 3.

No ha funcionado como estaba previsto, pero se puede reconducir

- a. Para aumentar el tiempo de duración de la descarga de las avenidas del arroyo del Partido en el arroyo de la Cañada del Pinar, la Actuación núm. 3 había dispuesto medidas que, en las avenidas analizadas en este artículo, no llegaron a funcionar plenamente de acuerdo con lo previsto. Dichas medidas consistían en expansionar las avenidas en la superficie reservada al efecto, comprendida entre los arroyos del Partido y de la Cañada del Pinar, aguas abajo del vertedero lateral del Dique 1. Dicha superficie está dividida por el camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique que le atraviesa de oeste a este, dejando la zona norte aguas arriba del mismo (Figura 1). El esquema operativo se concretaba del modo siguiente: Los caudales de avenida que en el Dique 1 no pasaran directamente por su paramento frontal (vertedero y mechnal de fondo) en dirección a la sección badén-puente del Ajolí, derivarían hacia el arroyo de la Cañada del Pinar; donde serían retenidos aguas arriba del Dique 2 y posteriormente repartidos, de modo que una fracción pasara directamente por su vertedero aguas abajo del arroyo de la Cañada del Pinar y el resto del caudal vertiera por encima del camino asfaltado, hacia la zona sur de la superficie destinada a inundación-laminación-sedimentación.
- d. La puesta nuevamente en funcionamiento de los objetivos de la Actuación núm. 3 en el paraje que se comenta implicaría las operaciones siguientes: 1) La reparación del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique en

la sección donde se ha interrumpido; 2) Conseguir que las avenidas inunden la superficie prevista para ello, situada aguas abajo del camino asfaltado entre El Rocío y Villamanrique y 3) Eliminar cualquier obstáculo que impida al flujo de avenida dirigirse hacia el arroyo de la Cañada del Pinar en la superficie de inundación-laminación-sedimentación situada aguas abajo del mencionado camino asfaltado; porque, además de tratarse de su drenaje natural marcado por la pendiente del paraje en cuestión, el gradiente de ésta es tan suave, que resulta suficiente por sí mismo para regular la velocidad del flujo en el lugar. Además, el desagüe tendría lugar, como en el pasado, a través de los caños o antiguos derramaderos existentes en dicha superficie de inundación; aspecto que ha sido comprobado en el 2009 en la superficie inundación-laminación-sedimentación situada al norte del camino asfaltado durante el tránsito de las avenidas por el mismo.

Problemas que no se previeron, pero que están dentro de la lógica que pudieran ocurrir tratándose de procesos torrenciales y que requieren solución.

- a. La socavación del terreno aguas abajo del paso del flujo por el vertedero lateral del Dique 1. Este efecto se esperaba que fuera controlado por el resalto hidráulico que se generase en el lugar; en realidad no causó problemas salvo en el extremo sur del citado vertedero; donde la socavación afectó al ala izquierda del paramento frontal del Dique 1, descalzándola y creando el riesgo que la corriente pudiera abrir un paso de agua hacia el cauce del arroyo del Partido, lo que anularía el principal objetivo de la Actuación núm.3. El problema se detectó a tiempo y se adoptó como solución provisional inmediata cubrir el ala izquierda con la arena del lugar, a la espera de adoptar la solución definitiva. Ésta podría consistir en mantener la socavación para asegurar la formación del resalto hidráulico, pero proteger al mismo tiempo el ala en cuestión cubriéndola con sacos terreros, para que la corriente no pueda arrastrar la arena, la cubierta de sacos de arena podría reforzarse con una escollera exterior para asegurar la protección
- b. La escisión en el terreno producida en la superficie situada al este del muro de protección de la aldea de El Rocío, cerca de donde se ubica la estación de bombeo de la aldea de El Rocío, abriendo un nuevo paso de agua hacia la marisma. Esta vía (en azul en la imagen de la derecha de la Figura 11, con las flechas indicando hacia la marisma de El Rocío) no es un problema serio por el momento; pero podría

serlo, si la socavación (señalada en rojo en la Figura 11) remonta hasta unirse con el cauce del arroyo del Partido en dicho paraje, pues en este caso el arroyo daría un giro en dirección hacia la aldea de El Rocío, reactivando un nuevo brazo del cono de sedimentación en el lugar.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Científica del Proyecto Doñana 2005 y al Espacio Natural de Doñana, de la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA), su apoyo a través de la financiación de los proyectos de investigación que han permitido el conocimiento de la situación para redactar este artículo. Se reconoce especialmente al Ingeniero Director de las obras de la Actuación núm. 3, Benigno Bayán Jardín; al Técnico del Área de Conservación del PND, Carlos Urdiales Alonso y a los ayudantes de éste Abel Valero Lancho y Diego García Díaz; así como también a Juan Ignacio García Viñas que nos acompañó en los trabajos de campo.

BIBLIOGRAFÍA

Mao L. 2005. Analisis comparativa del trasporto solido di corsi torrentizi in diversi ambiti geografici Ph Thesis. pp. 307. Dipartimento Territorio e Sistema Agro-Forestali. Università degli Studi di Padova.

Mintegui J. A., Robredo J. C. & Sendra 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.

Mintegui J. A., Lenzi M. A., Robredo 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.

Mintegui J. A., Robredo J. C., Gonzalo C de & Huelin P. 2009 Seguimiento de la Actuación núm. 3 del Proyecto Doñana 2005, 139 pp., E. T. S. de Ingenieros de Montes, Departamento Ingeniería Forestal, Universidad Politécnica de Madrid.

Mintegui J. A., Robredo J. C., Gonzalo C de & Huelin P. 2010 Restoration of a degraded torrential stream by means of a flood control system: the case of Arroyo del Partido stream (Spain). Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III, Editors: Wrachien D. de & Brebbia C. A., pp. 213-223, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 67, doi:10.2495/DEB100181

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, pp. 201, 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.

Urdiales C. 1996. Informe sobre los cambios recientes en el tramo final del arroyo del Partido.

Parque Nacional de Doñana. Organismo Autónomo Parques Nacionales. 30 pp. Anexo fotográfico 45 pp. Ministerio de Medio Ambiente.

U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2008. HEC-RAS (River Analysis System). Version 4.0.

U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. 2009. HEC-HMS (Hydrologic Modelling System). Version 3.4.