

Editores  
Luis José Balairón Pérez  
David López Gómez

**ACTIVIDAD EXPERIMENTAL DE I+D+i EN  
INGENIERÍA HIDRÁULICA EN ESPAÑA.  
RED DE LABORATORIOS DE HIDRÁULICA  
DE ESPAÑA. SEMINARIO 2014**

**EDITORIAL  
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



Primera edición, 2015

© Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez

© de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València  
[www.lalibreria.upv.es](http://www.lalibreria.upv.es)

© Todos los nombres comerciales, marcas o signos distintivos de cualquier clase contenidos en la obra están protegidos por la Ley

© de las fotografías: el autor

Imprime: Byprint Percom sl.

ISBN: 978-84-943649-6-9

Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España





Actividad experimental de I+D+i  
en ingeniería hidráulica en España

#### **SEMINARIO 2014. COMUNICACIONES DE LAS LÍNEAS PRIORITARIAS**

- A. CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE ESPACIOS FLUVIALES.**
- B. HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES.**
- C. RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA.**
- D. SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS.**

Madrid, 10 de junio de 2014

Editores

Luis José Balairón Pérez

David López Gómez



## **PRESENTACIÓN**

La **Red de Laboratorios de Hidráulica de España (RLHE)**, se constituyó en el año 2008 como un foro encuentro entre los principales Centros de Investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España.

Las instituciones que participan en la RLHE son el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y las Universidades de Castilla La Mancha (UCLM), A Coruña (UDC), Politécnica de Cataluña (UPC), Politécnica de Cartagena (UPCT), Politécnica de Madrid (UPM) y Politécnica de Valencia (UPV).

El objetivo principal de la RLHE es constituir un foro o espacio de encuentro entre los principales centros de investigación en materia de ingeniería hidráulica experimental de España que permita detectar complementariedades, contribuir al fortalecimiento de la actividad de I+D en el campo específico de la ingeniería hidráulica e impulsar proyectos de investigación aplicada y de desarrollo tecnológico e innovación en común en las materias específicas de la Red.

Anualmente la Red celebra un Seminario en el que los distintos centros que la integran presentan la actividad en la que se encuentran involucrados ese año. En el año 2014 este Seminario se celebró en Madrid organizado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX. En esta publicación se recogen los resúmenes de las ponencias presentadas.

Luis Balairón Pérez

Coordinador de la Red de Laboratorios  
de Hidráulica de España, RLHE



## ÍNDICE

### Resúmenes Línea Prioritaria A

#### Criterios hidromorfológicos para la restauración de espacios fluviales

METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPACIO DE LIBERTAD FLUVIAL EN RÍOS EFÍMEROS (RAMBLAS, ARROYOS) ( <i>María Elvia Guzmán, José Anastasio Fernández, José Luis García, David López</i> ) .....	7
SISTEMA DE DETECCIÓN DE PECES PARA ESCALAS DE HENDIDURA VERTICAL UTILIZANDO TECNOLOGÍA ESCÁNER LÁSER Y VISIÓN ARTIFICIAL ( <i>Ángel Rico, Álvaro Rodríguez, Juan R. Rabuñal, Daniel Villares, Luis Pena, Jerónimo Puertas</i> ) .....	11
MEDIDAS EXPERIMENTALES DE FLUJO CON TRANSPORTE DE SEDIMENTOS A TRAVÉS DE REJAS DE FONDO. INFLUENCIA DE LAS GRAVAS SOBRE LA REJA ( <i>Luis G. Castillo, Juan T. García Y José M. Carrillo</i> ) .....	15
MONITORIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA Y DE LA CALIDAD DE AGUAS EN HUMEDALES ARTIFICIALES EN EL MARCO DEL PROYECTO LIFE ALBUFERA ( <i>Sara Gargallo, Beatriz Nácher, Carmen Hernández, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Eduardo Albentosa, Miguel A. Eguibar, Miguel Martín</i> ) .....	19

### Resúmenes Línea Prioritaria B

#### Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses

MEJORA DE LA GESTIÓN EN AVENIDAS DE UN EMBALSE HIDROELÉCTRICO APLICANDO PROCEDIMIENTOS PROBABILÍSTICOS ( <i>Paola Bianucci, Álvaro Sordo, Javier Moralo, Luis Garrote</i> ) .....	25
COMPARACIÓN DE DIFERENTES MÉTODOS DE DETERMINACIÓN DE LA PRESIÓN MEDIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDAL FUGADO ( <i>David J. Vicente</i> ) .....	27
LA TELEDETECCIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE MEDIDAS HIDRODINÁMICAS DE LAS MARISMAS DE DOÑANA ( <i>Belén Martí, Josep Dolz, Anaïs Ramos, Ernest Bladé</i> ) .....	29
CIERRE AUTOMÁTICO EN TIEMPO REAL DE CANALES DE REGADÍO: ESTUDIO EN UN CANAL DE LABORATORIO ( <i>Eduard Galvis, Manuel Gómez, Klaudia Horvath, José Rodellar, Juan A. Mantecón</i> ) .....	33

## Resúmenes Línea Prioritaria C

### Riesgo asociado a la escorrentía urbana

PELIGROSIDAD, VULNERABILIDAD Y RIESGO ANTE SUCESOS DE LLUVIA EXTREMA EN ENTORNO URBANO ( <i>Eduardo Martínez, Manuel Gómez, Beniamino Russo</i> ) .....	39
DESARROLLO DE TUBERÍAS OVOIDES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA DE LAS REDES DE ALCANTARILLADO ( <i>Juan Naves, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez</i> ) .....	41
ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ESCORRENTÍAS PRODUCIDAS POR UNA CUBIERTA VEGETADA Y UNA CUBIERTA CONVENCIONAL ( <i>Carmen Hernández, Beatriz Nácher, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Miguel Martín, Sara Perales</i> ).....	45
HERRAMIENTA DE APOYO A LA DECISIÓN PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA GESTIÓN DEL AGUA DE LLUVIA EN CIUDADES MEDITERRÁNEAS ( <i>Adrián Morales, Ignacio Escuder, Ignacio Andrés, Sara Perales</i> ).....	49
CARACTERIZACIÓN DE LA ACUMULACIÓN Y LAVADO DE CONTAMINANTES EN CALZADAS URBANAS ( <i>Carmen Hernández, Beatriz Nácher, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Miguel Martín</i> ).....	53

## Resúmenes Línea Prioritaria D

### Seguridad de presas. Aspectos hidrológicos e hidráulicos

PROBLEMAS DE DIFUSIÓN NUMÉRICA EN SPH ( <i>David López, Rubén Díaz</i> ) .....	59
IMPLICACIONES DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA EN LA SEGURIDAD DE PRESAS ( <i>Álvaro Sordo, Paola Bianucci, Luis Garrote</i> ).....	63
CARACTERIZACIÓN DEL RESALTO HIDRÁULICO AIREADO EN CANALES PEQUEÑOS ( <i>Daniel Valero, Francisco J. Vallés, Rafael García, Ignacio Andrés, Juan Marco</i> ).....	65
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LABORATORIO Y SIMULACIONES NUMÉRICAS. ESTUDIO DE RESALTOS HIDRÁULICOS ( <i>Luis G. Castillo, José M. Carrillo, Juan T. García, Antonio Viguera</i> ) .....	67
INSTRUMENTACIÓN DEL MODELO FÍSICO LS-EMULSION ( <i>Rubén Díaz, David López</i> ).....	71

**LÍNEA PRIORITARIA A**

**CRITERIOS HIDROMORFOLÓGICOS PARA LA RESTAURACIÓN DE  
ESPACIOS FLUVIALES**



## **Metodología para la determinación del Espacio de Libertad Fluvial en ríos efímeros (ramblas, arroyos)**

**María Elvia Guzmán** <sup>(1)</sup>, **José Anastasio Fernández** <sup>(1)</sup>, **José Luis García** <sup>(1)</sup>, **David López** <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> *Universidad Politécnica de Madrid. mariaelviag@gmail.com*

<sup>(2)</sup> *Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX*

Las ramblas son cursos fluviales efímeros (Ephemeral streams), se caracterizan por la circulación intermitente y funcionamiento espasmódico del agua, además de tener lechos amplios y pedregosos. Para designar a este tipo de geoformas, se utilizan diferentes nombres: riera, barranco, gully, entre otras.

Los cauces efímeros, sujetos a dinámica torrencial, deben ser analizados, por tanto, de forma diferente a como se hace tradicionalmente con los ríos de regiones húmedas. Su dinámica es más asociable a la de los ríos de regiones áridas que abarcan, además, casi la mitad de la superficie terrestre, con un 20% de su población, y de ahí su importancia y el creciente interés por su estudio.

Desde el punto de vista hidrológico, la circulación depende casi exclusivamente de la lluvia, dada la desconexión entre el freático y lechos fluviales, por lo que origina la ausencia de caudal base. Por ello se habla de avenidas, tratándose éstas normalmente de episodios cortos pero dotados de altos caudales y espectaculares efectos geomorfológicos. De esta manera son unidades hidrogeológicas de amplia y compleja situación ya que recogen las aguas precipitadas, que aunque escasas en el año, suelen ser muy intensas.

Cualquier tipo de corriente hídrica, necesita áreas adicionales al canal o espejo de agua, donde pueda ajustar su morfología y desarrollar los procesos naturales de erosión, sedimentación y transporte; estos espacios es lo que denominamos “Espacio de Libertad Fluvial – ELF”.

Mediante la selección de algunas Ramblas Mediterráneas: Benipila, Ladrillar y Cantera, localizadas en la Región de Murcia (España), se desarrolla una metodología que define el espacio de libertad fluvial, mediante la construcción de índices, que dan a conocer la dinámica hidrológica, hidráulica y

geomorfológica. Las fotografías aéreas históricas desde el año 1928, han permitido conocer su evolución hasta nuestros días e identificar los cambios significativos en el transcurso del tiempo.

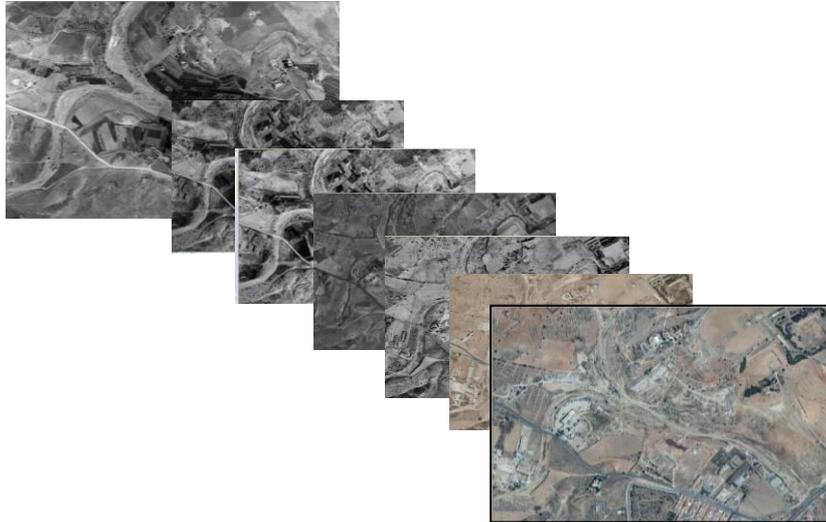


Figura 1. Evolución temporal de la Rambla Benipila desde 1928 -2011. Murcia - España.

Sobre estas Ramblas se analiza la dinámica fluvial en un periodo de 83 años. Los tramos seleccionados corresponden a sectores no confinados es decir donde la rambla tiene espacio para moverse y no está limitado ni por el relieve o por infraestructuras.

Además de analizar el área del cauce, se busca la relación existente con el ancho, la longitud de orilla y la presencia de vegetación., todo ello tomando como referencia el año más antiguo que para este caso es 1928.

Se están buscando relaciones entre variables del Espacio de libertad fluvial, que está definido por la envolvente del cauce de todos los años analizados, como son el área y el ancho, con variables independientes propias de la cuenca como lo son: el área de la cuenca y el caudal conformador del lecho, es decir el que corresponde al periodo de retorno de la máxima crecida ordinaria.

La definición del Espacio de libertad fluvial permitirá establecer estrategias de planificación del uso del suelo mediante las cuales se pueda determinar el uso principal, compatible y prohibido; sin olvidar que el cauce de una corriente hídrica engloba el canal de estiaje, el canal de aguas bajas, y cuando exista, la

franja de ribera dinámicamente conectada a las anteriores lo cual en muchos casos, ha formado parte del cauce histórico.



Figura 2. Cauce típico de las Ramblas mediterráneas.

### Referencias.

Fisher, S. G., Heffernan, J. B., Sponseller, R. a., & Welter, J. R. (2007). Functional ecomorphology: Feedbacks between form and function in fluvial landscape ecosystems. *Geomorphology*, 89(1-2), 84–96. doi:10.1016/j.geomorph.2006.07.013

Fryirs, K. (2003). Guiding principles for assessing geomorphic river condition: application of a framework in the Bega catchment, South Coast, New South Wales, Australia. *Catena*, 53(1), 17–52. doi:10.1016/S0341-8162(02)00199-6

Magdaleno, F., Anastasio Fernández, J., & Merino, S. (2012). The Ebro River in the 20th century or the ecomorphological transformation of a large and dynamic Mediterranean channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(5), 486–498. doi:10.1002/esp.2258



## **Sistema de detección de peces para escalas de hendidura vertical utilizando tecnología escáner láser y visión artificial**

**Ángel Rico** <sup>(1)</sup>, **Álvaro Rodríguez** <sup>(1)</sup>, **Juan R. Rabuñal** <sup>(2)</sup>, **Daniel Villares** <sup>(2)</sup>, **Luis Pena** <sup>(3)</sup>, **Jerónimo Puertas** <sup>(3)</sup>

*<sup>(1)</sup> Dpto. de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Universidad da Coruña. [angel.rico@udc.es](mailto:angel.rico@udc.es)*

*<sup>(2)</sup> Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Enxeñería Civil (CITEEC)*

*<sup>(3)</sup> Dpto. de Ingeniería Hidráulica. Universidad da Coruña*

Las escalas de hendidura vertical son una de las estructuras más utilizadas para sortear obstáculos. Estas estructuras hidráulicas permiten el movimiento de los peces aguas arriba en los ríos, sorteando obstáculos como presas, centrales hidroeléctricas y otros. Conocer la densidad de los peces que pasan por estas estructuras puede ayudar a conocer la eficacia de las mismas, así como conocer características migratorias de las especies.

La técnica propuesta es un método no invasivo para los peces y sin necesidad de observación directa. Haciendo uso de la tecnología láser y combinándola con técnicas de visión artificial se detectan objetos que pasan por una determinada ubicación. En la siguiente figura se ilustra el proceso de detección del pez en el que se utiliza un sensor láser y una cámara para tomar imágenes del instante del paso del pez.

El sensor láser devuelve las distancias a las que el objeto es detectado. A continuación con ayuda de una aplicación informática que utiliza técnicas de visión artificial se determina si el objeto interceptado por el haz del láser se puede considerar candidato para seguir el proceso de reconocimiento. En ese caso, sobre el objeto se toma una fotografía, con ayuda de una cámara enfocada a la zona a donde está dirigido del haz del láser, que será analizada con técnicas, nuevamente, de visión artificial y que comparando con ciertos patrones conocidos la aplicación pueda determinar si el objeto detectado es un pez.

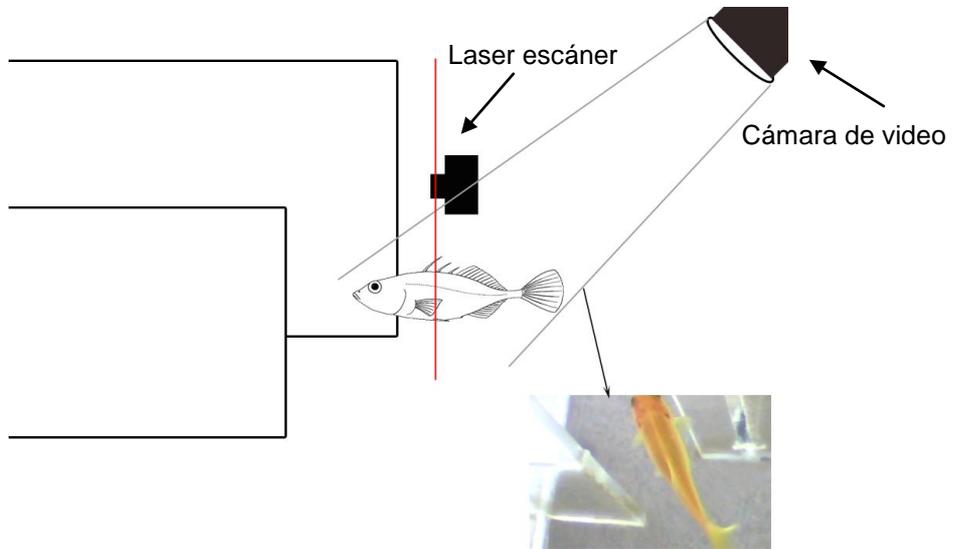


Figura 1. Ilustración del momento en el que el pez es detectado por el láser y la cámara de video.

Utilizando esta técnica se puede cuantificar la cantidad de peces que pasan por el punto que se quiere analizar lo que se puede utilizar para, por ejemplo, conocer las eficacias de las escalas de hendidura vertical, estimar la salud de los ríos en función del número de peces que habitan en él, saber si es buen momento para abrir un coto de pesca, etc.

En la Figura 2 se muestra el aspecto de la aplicación informática en la que se realiza todo el proceso comentado.

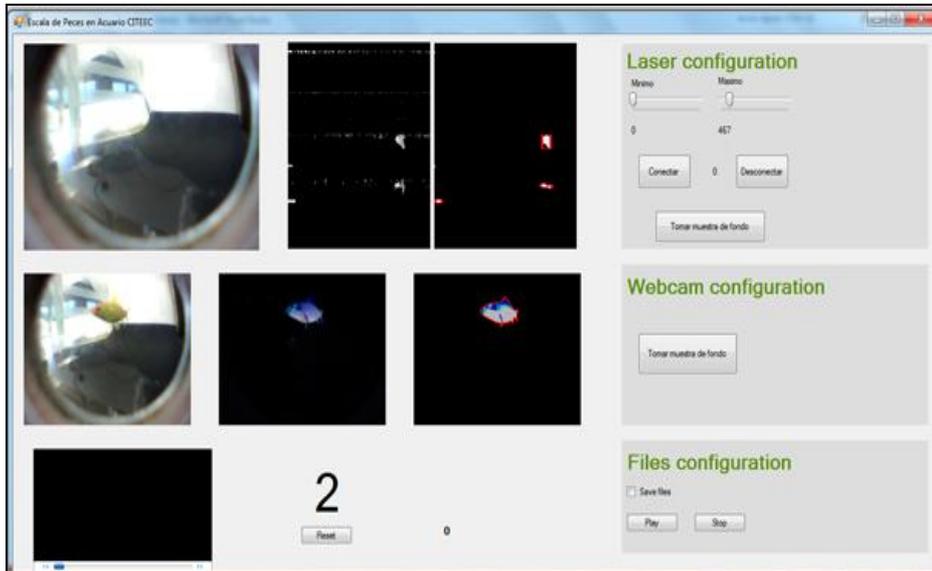


Figura 2. Aspecto de la aplicación informática.

### **Agradecimientos.**

Financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (Ref. CGL2012-34688) y Fondos FEDER. Así mismo se agradece la colaboración del Centro de estudios Hidrográficos (CEH) del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas).



## **Medidas experimentales de flujo con transporte de sedimentos a través de rejas de fondo. Influencia de las gravas sobre la reja**

**Luis G. Castillo, Juan T. García y José M. Carrillo**

***Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT.  
juan.gbermejo@upct.es***

Para la captación de caudales en cauces efímeros y de flujos torrenciales con una alta carga de sedimentos, se están analizando sistemas de captación de fondo. Están formados por rejas dispuestas en la solera en dirección longitudinal al flujo. Actualmente, existen datos insuficientes del grado de oclusión de las rejas como consecuencia de la deposición de sólidos sobre éstas, o de la cantidad de sedimentos que se introducen en el sistema de rejas y que son transportados a lo largo del canal de agua captada. En la bibliografía aparecen únicamente recomendaciones cualitativas como las de Ract-Madoux et al. (1955) o Bouvard (1992).

Este trabajo se centra en el estudio de los casos con agua clara y con transporte de gravas, analizándose las diferencias en la longitud de reja mojada necesaria para captar un cierto caudal así como la eficiencia de la reja, teniendo en cuenta la oclusión que se produce en las rejas con el paso de las gravas (fig. 1). Asimismo los casos de agua clara medidos en el Laboratorio de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) se han simulado y comparado con programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Se han llevado a cabo diversas pruebas experimentales centradas en la influencia de los materiales empleando granulometrías con un  $d_{50}$  igual o superior al espaciamiento entre las barras.

Los ensayos muestran una disminución del caudal captado debido a los efectos de oclusión. Se ha establecido además una relación entre la pendiente longitudinal de la reja y la eficiencia máxima, la cual se obtiene con pendiente longitudinal en torno al 30%.

Las simulaciones de flujo con agua clara llevadas a cabo mediante CFD muestran un buen acuerdo con los datos experimentales, considerando diferentes pendientes longitudinales y caudales de aproximación.

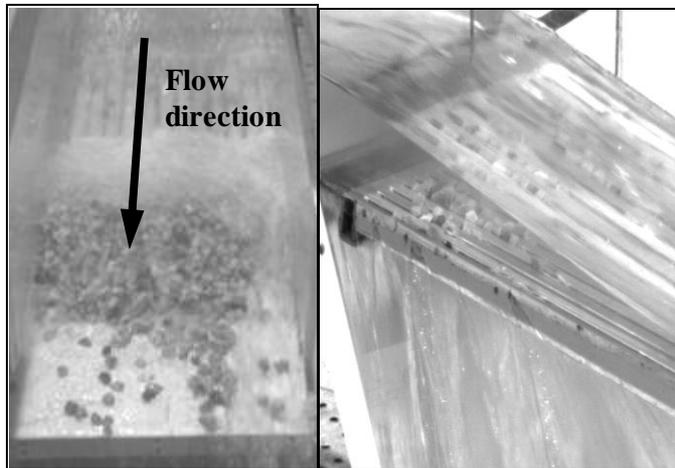


Figura. 1 Reja parcialmente ocluida por el transporte de gravas (laboratorio UPCT).

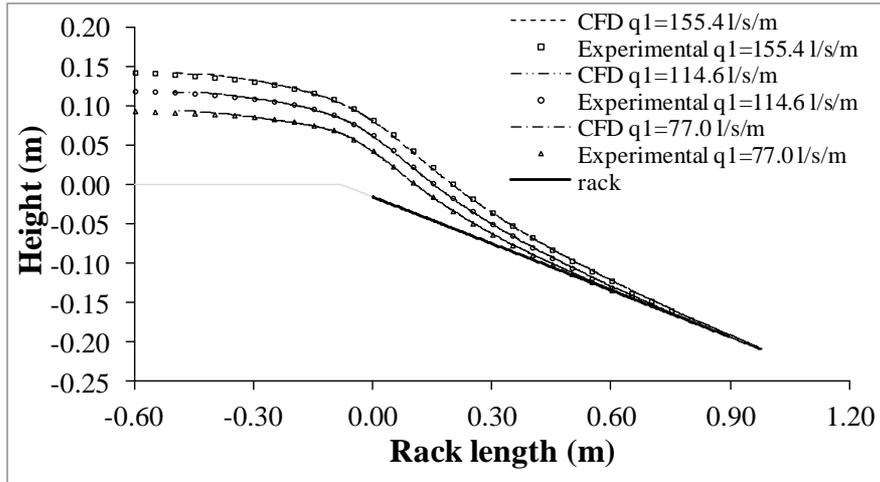


Figura 2. Perfiles de flujo medidos sobre una barra comparados con los simulados mediante CFD, correspondientes a una pendiente del 20% e índice de huecos de la reja de 0.28.

Las longitudes de reja medidas en laboratorio para captar un cierto caudal bajo el efecto de la oclusión por gravas tienden a ser mayores que las

recomendadas en la bibliografía. De igual modo, los calados sobre las barras tienden a incrementarse en las medidas experimentales debido a la disminución del índice de huecos.

### **Referencias.**

Bouvard, M. 1992. Mobile Barrages & Intakes on Sediment Transporting Rivers. IAHR Monograph. Rotterdam: Balkema.

Castillo, L.G., Carrillo, J.M. & García, J.T. 2013. Flow and sediment transport through bottom racks. CFD application and verification with experimental measurements. Proc. 35th IAHR Congress, Chengdu, 8-13 September 2013.

Nosedá, G. 1956. Correnti permanenti con portata progressivamente decrescente, defluenti su griglie di fondo. L'Energia Elettrica, 565-581.

Ract-Madoux, M., Bouvard, M., Molbert, J. & Zumstein, J. 1955. Quelques réalisations récentes de prises en-dessous à haute altitude en Savoie. La Houille Blanche, 6: 852-878.

Righetti, M. & Lanzoni, S. 2008. Experimental Study of the Flow Field over Bottom Intake Racks. Journal of Hydraulic Engineering 134(1): 15-22.



## **Monitorización de la hidráulica y de la calidad de aguas en humedales artificiales en el marco del proyecto LIFE albufera**

**Sara Gargallo, Beatriz Nácher, Carmen Hernández, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Eduardo Albentosa, Miguel A. Eguibar, Miguel Martín**

***Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. mmartin@hma.upv.es***

En el marco del proyecto LIFE12 ALBUFERA “Gestión integrada de tres humedales artificiales en cumplimiento de las directivas Marco de Aguas, Aves y Hábitats” se está llevando a cabo un seguimiento del funcionamiento hidráulico y ambiental de los tres sistemas de humedales artificiales que protagonizan el proyecto: el Tancat de la Pipa, el Tancat de Milia y el Tancat de l’Illa.

En el “Tancat de la Pipa”, cuya planta se puede observar en la figura 1, se está trabajando sobre el humedal artificial de flujo superficial denominado fp, identificable en la imagen por los puntos P3 a P6. Este humedal tiene 315 metros de longitud y 43 metros de anchura. Está dividido en tres celdas conectadas en serie y el paso del agua entre las celdas se produce a través de una compuerta de 40 cm de anchura. El caudal de alimentación procede del lago de l’Albufera a través de los puntos P1 y P2. Se trata, por tanto, de aguas altamente eutrofizadas, con contenidos muy elevados de materia orgánica fitoplanctónica.

El objetivo principal del control hidráulico es asegurarse de que el caudal que circula a través del humedal se mantiene en el valor asignado al inicio del estudio. Este valor es de 10.1 l/s, que equivale a una carga hidráulica de 0.06 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> d, y se consideró un valor adecuado para evaluar los rendimientos de depuración del humedal y a partir del cual probar otros valores.



Figura 1. Imagen del Tancat de la Pipa con indicación de los puntos de muestreo.

Aunque inicialmente se planteó la monitorización hidráulica mediante el empleo de minimolinetes, al poco tiempo de iniciarse el proyecto se pudo disponer de instrumentación suficiente para monitorizar en continuo las variables hidráulicas de interés. Así, se ha instalado en el sistema la siguiente instrumentación (figura 2):

- Punto P3. Caudalímetro de ultrasonidos en el conducto de entrada al sector.
- Punto P4: Caudalímetro de ultrasonidos en el paso entre celdas y sonda de nivel.
- Punto P5: Sonda de nivel hidrostático.
- Punto P6: Caudalímetros de ultrasonidos en los tubos de salida y sonda de nivel hidrostático en la última celda del sector.



Figura 2. Sonda de nivel en paso intermedio (P5) y sensores de ultrasonidos en salidas (P6).

La evaluación de la calidad de agua en el humedal artificial incluye, además de las variables medidas in situ (pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura) variables químicas como DQO, nitrógeno total, amoniacal, nitritos y nitratos, fósforo total y fosfatos, sílice inorgánica y alcalinidad. También se monitorizan algunas variables biológicas como Clorofila a, identificación de fitoplancton y zooplancton y de macroinvertebrados. Los muestreos se realizan cada tres semanas en los ocho puntos indicados en la Figura 1. Es de singular interés destacar que el agua tratada es devuelta al lago pero con menores concentraciones de materia orgánica, sólidos suspendidos y nutrientes.

El objetivo final del estudio es demostrar cómo la gestión de humedales artificiales ubicados en parajes naturales (en este caso en el Parque Natural de la Albufera) puede contribuir a la mejora de la calidad de las aguas de estos entornos y a la vez a la mejora de la biodiversidad.



**LÍNEA PRIORITARIA B**

**HIDRODINÁMICA DE EMBALSES. GESTIÓN SOSTENIBLE DE EMBALSES**



## **Mejora de la gestión en avenidas de un embalse hidroeléctrico aplicando procedimientos probabilísticos**

**Paola Bianucci** <sup>(1)</sup>, **Álvaro Sordo** <sup>(1)</sup>, **Javier Moralo** <sup>(2)</sup>, **Luis Garrote** <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> *Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid. [paola.bianucci@upm.es](mailto:paola.bianucci@upm.es)*

<sup>(2)</sup> *Gas Natural Fenosa Engineering*

En este trabajo se presenta la evaluación y mejora de la operación del embalse hidroeléctrico de Belesar (río Miño) empleando un enfoque multiobjetivo y probabilístico. En la práctica profesional habitualmente se utilizan procedimientos fundamentalmente determinísticos para evaluar el comportamiento de una estrategia de operación de un embalse y compararla con otras posibles alternativas. En este trabajo se analizó el comportamiento de dos estrategias de laminación predefinidas (S1 y S2) ante un conjunto extenso y representativo de avenidas. Para obtener dicho conjunto de avenidas se generó estocásticamente una serie continua de lluvia, aplicando el modelo RainSimV3, de la cual se extrajeron los eventos de tormenta que se transformaron en hidrogramas empleando un modelo hidrológico simple. A partir de estos hidrogramas se generó la serie de avenidas máximas anuales (formada por 1000 eventos) que permitió caracterizar adecuadamente la sollicitación hidrológica del embalse (Figura 1). La evaluación se realizó teniendo en cuenta diferentes aspectos relativos a la laminación, generación de energía y funcionalidad de la operación. Mediante indicadores estadísticos calculados a partir de las distribuciones de probabilidad de diferentes variables aleatorias se caracterizaron estos aspectos del funcionamiento de las estrategias de operación. Los indicadores seleccionados fueron: riesgo de superar un caudal de vertido límite (R1), riesgo de sobrevertido (R2), valor esperado del número medio de maniobras durante el pico de avenida (EV1), valor esperado de los vertidos improductivos (EV2) y valor esperado de la energía producida (EV3). Cada uno de estos indicadores constituye una función objetivo (FO) a optimizar, sin embargo, se trata de objetivos que entran en conflicto entre sí. Así, al comparar los valores de los indicadores correspondientes a las dos estrategias disponibles ninguna se muestra absolutamente mejor que la otra sino que constituyen soluciones de compromiso. Con el objetivo de mejorar la operación del embalse se

parametrizaron ambos procedimientos de laminación y se evaluaron cada una de las estrategias de laminación derivadas de la parametrización, calculando las FO antes mencionadas. Del contraste de las diferentes soluciones obtenidas se definió una solución alternativa (S2m) que ofrece una solución de compromiso equilibrada, mejorando ciertos aspectos respecto de las originales sin empeorar significativamente los restantes (Tabla 1). Esta herramienta facilitó la evaluación analítica y sistemática de las reglas de operación, brindando una base razonada para asistir a los operadores de la presa en la toma de decisiones.

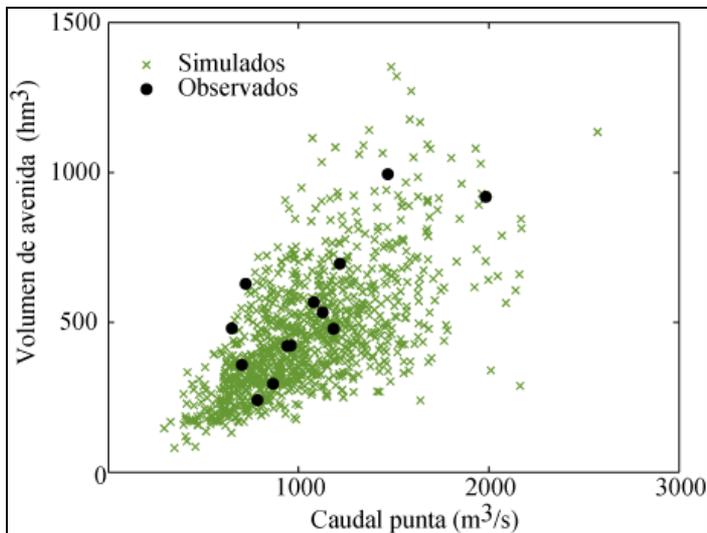


Figura 1. Relación entre el caudal punta y el volumen de los hidrogramas de avenida generados sintéticamente (cruces grises). Comparación con avenidas observadas (puntos negros)

Tabla 1. Evaluación y comparación del comportamiento de las estrategias de laminación originales (S1 y S2) y la alternativa propuesta (S2m).

Estrategia	Nivel inicial [m]	R1 [--]	R2 [--]	EV1 [--]	EV2 [hm <sup>3</sup> ]	EV3 [MW-h]
S1	327.0	0.001	0.009	6	209	73080
S2	325.5	0.040	0.000	1	239	85475
S2m	327.0	0.038	0.000	1.5	202	86638

## **Comparación de diferentes métodos de determinación de la presión media en sistemas de distribución de agua para la estimación de caudal fugado**

**David J. Vicente**

**Universidad Politécnica de Madrid. [dvicentegonzalez@gmail.com](mailto:dvicentegonzalez@gmail.com)**

Uno de los objetivos primordiales para los gestores de sistemas de distribución de agua es la minimización del agua que se pierde a través de su red. Por lo general, la evaluación de estas pérdidas se lleva a cabo a nivel de sector o distrito (porciones de red aisladas hidráulicamente del resto mediante válvulas de corte). Conocer exactamente este caudal resulta una práctica inabordable debido a limitaciones tanto económicas como técnicas. Por ello, proliferan métodos para la estimación de estas fugas y así poder conocer la eficiencia de las medidas implantadas para disminuir el caudal perdido.

Esta estimación en muchas ocasiones se basa en la relación existente entre la presión del sistema y el caudal fugado. A través de expresiones más o menos simplificadas se puede estimar el caudal perdido de cada uno de los sectores conociendo la presión media del mismo. Identificar un nodo que represente esta presión media facilitaría esta tarea y ayudaría enormemente la transferencia de esta metodología a la práctica profesional. A este punto se le denomina '*Nodo de Presión Media*'.

Existen diversos métodos para la identificación de este nodo:

**Método hidráulico** – Si se dispone de un modelo detallado de la red y mediante el correspondiente software de simulación hidráulica se puede calcular la presión dinámica en cada nodo ' $i$ ' y en cada instante ' $t$ '. Adjudicando un peso a cada nodo ' $c_i$ ', a partir de las presiones de cada nodo se puede calcular la presión media de la zona de estudio en cada instante de simulación (generalmente paso temporal horario).

**Método topográfico** – Este método se basa en un enfoque topográfico y desprecia la variación de presiones debido a las pérdidas de carga. Así, la presión media se calcula como diferencia entre la presión estática a la entrada del sector en cada instante ' $p_i$ ' y la diferencia de cota ' $\Delta Z$ ' entre la entrada y el punto medio topográfico del sector. La determinación de este punto se realiza a su vez según distintos criterios de ponderación.

En el presente estudio se analizan ambos métodos, comparándolos entre sí y definiendo distintos criterios de ponderación para cada nodo ' $c_i$ ' (uniforme, consumo diario, número de acometidas comprendidas, entre otros). Para ello, se han representado diferentes escenarios hidráulicos y topologías de red a partir de un modelo hidráulico general. La topología del modelo creado está basado en una red ejemplo ampliamente referenciada en la literatura científica especializada.

Los resultados obtenidos se han analizado con MATLAB, determinando en cada caso el *Nodo de Presión Media*. Como conclusiones se presentan las ventajas y desventajas de cada sistema de ponderación, de cada método y su ámbito de aplicación. Se pretende así sentar ciertas bases para la aplicación de estos métodos en la práctica profesional en el cálculo de fugas totales de un sector de una red de distribución.

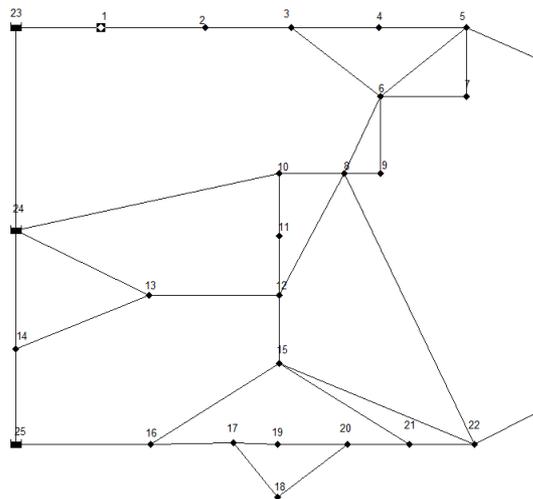


Figura 1. Red creada con software de simulación hidráulica 'EPANET' para elaboración de modelos.

## **La teledetección para la adquisición de medidas hidrodinámicas de las marismas de Doñana**

**Belén Martí, Josep Dolz, Anaïs Ramos, Ernest Bladé**

***Instituto FLUMEN UPC-CIMNE. belen.marti@upc.edu***

Las marismas de Doñana, situadas en el Suroeste de la península Ibérica, experimentan ciclos anuales de inundación en otoño y secado en primavera. Como en cualquier humedal, la sostenibilidad de Doñana depende críticamente de sus recursos de agua. Desde la década de los noventa se han realizado importantes esfuerzos de monitorización y modelación para evaluar la salud del ecosistema marismeño y restaurar en lo posible su régimen hidrológico natural, para prever riesgos derivados de las actividades socio-económicas próximas y del cambio climático, y para diseñar estrategias de adaptación que garanticen su sostenibilidad.

Entre los años 2006 y 2010 el Instituto Flumen solicitó la adquisición de numerosas imágenes satelitales de Doñana para obtener observaciones regionales y sinópticas de la superficie inundada. Con ello se pretendía avanzar en el conocimiento de la hidrodinámica de las marismas y calibrar el modelo hidráulico bidimensional de las mismas. Las imágenes fueron adquiridas por el sensor radar en banda C ASAR, a bordo del satélite Envisat de la Agencia Espacial Europea. La capacidad de la banda C para atravesar la cobertura nubosa permitió monitorizar el proceso de llenado a pesar de la presencia de nubes. Las imágenes ASAR se solicitaron en siete ángulos de incidencia diferentes para incrementar la frecuencia de observación y la mayoría de ellas fueron adquiridas con la configuración de polarizaciones HH/VV.

Las imágenes satelitales se analizaron con la ayuda de datos de campo para identificar el efecto de la inundación sobre el coeficiente de retrodispersión radar y se extrajeron conclusiones sobre la posibilidad de discriminar superficies emergidas e inundadas en función del ángulo de incidencia, tipo de cobertura vegetal y fase fenológica. La cartografía de inundación se abordó entonces mediante el uso sinérgico de los datos ASAR con el modelo digital del terreno y el mapa de vegetación de Doñana.

Las escenas ASAR adquiridas durante episodios de viento persistente permitieron observar el desplazamiento de varios cuerpos de agua en la dirección del viento, corroborando la importancia de esta acción sobre la

hidrodinámica de Doñana. Estas observaciones se utilizaron para comparar y validar diferentes formulaciones del arrastre del viento en el modelo hidrodinámico bidimensional de las marismas.

Los mapas de inundación derivados de imágenes previas y posteriores a eventos de precipitación proporcionaron observaciones espaciales del efecto de la lluvia sobre el estado de inundación. Los hietogramas registrados in situ y los mapas de inundación correspondientes, aportan valiosa información de calibración y validación para el modelo hidrodinámico bidimensional.

Las imágenes ASAR permitieron determinar el alcance espacial de los flujos mareales en Doñana, cuando las marismas están secas. El modelo hidráulico de simulación reprodujo con éxito la influencia mareal observada.

A partir de las imágenes satelitales se observó la disminución del área inundada de distintas lagunas de Doñana, lo que proporcionó estimaciones de pérdidas de agua en subcuencas no aforadas. Las imágenes permiten además medir las zonas inundadas con vegetación emergente, dato necesario para el estudio y modelización de las pérdidas por evapotranspiración.

La evolución temporal de la retrodispersión radar mostró una gran sensibilidad al grado de desarrollo de la vegetación helófito, lo que apunta a la posibilidad de obtener mapas de biomasa a partir de las imágenes ASAR. Estos mapas suministrarían coeficientes de rugosidad temporal y espacialmente distribuidos al modelo hidráulico.

Los conocimientos derivados de este estudio podrán ser aplicados y extendidos con los datos polarimétricos de Doñana del radar canadiense Radarsat-2 y la constelación europea Sentinel-1, ambos operando en banda C, por el sistema japonés ALOS-2/PALSAR-2, en banda L, y por la futura misión española PAZ, en banda X.

## **Referencias.**

Martí-Cardona, B., Dolz-Ripollés, J., and López-Martínez, C., 2013. "Wetland inundation monitoring by the synergistic use of ENVISAT/ASAR imagery and ancillary spatial data", *Remote Sensing of Environment*, 139(12), 171–184. doi:10.1016/j.rse.2013.07.028.

Martí-Cardona, B., López-Martínez, C., Dolz-Ripollés, J., and Bladé-Castellet, E., 2010. "ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring", *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2802–2815. doi:10.1016/j.rse.2010.06.015.

Ramos-Fuertes, A., Martí-Cardona, B., Bladé, E., and Dolz, J., 2013. "Envisat/ASAR images for the calibration of the wind drag action in Doñana wetlands 2D hydrodynamic model", *Remote Sensing*, 6(1), 379-406. doi:10.3390/rs6010379.



## **Cierre automático en tiempo real de canales de regadío: estudio en un canal de laboratorio**

**Eduard Galvis** <sup>(1)</sup>, **Manuel Gómez** <sup>(1)</sup>, **Klaudia Horvath** <sup>(1)</sup>, **José Rodellar** <sup>(2)</sup>, **Juan A. Mantecón** <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> *Instituto FLUMEN – UPC. [eduard.galvis@upc.edu](mailto:eduard.galvis@upc.edu)*

<sup>(2)</sup> *Grupo Codalab – UPC*

### **Introducción.**

Los canales de regadío suelen trabajar en un cierto rango de operación determinado generalmente por el flujo disponible para alimentar el canal y las necesidades de agua de los usuarios. Existen sin embargo situaciones en las cuales se requieren cambios abruptos en dichas condiciones de operación. Un ejemplo típico de esta situación es el cierre progresivo de los elementos de regulación del canal, generalmente compuertas, para conseguir un flujo circulante próximo a cero mientras se mantienen unos ciertos calados máximos y mínimos en los distintos tramos del canal.

El cierre de un canal puede estar motivado por el ahorro de agua durante los periodos de inactividad de los regantes, por el cese de producción de energía en una central hidroeléctrica situada en la cabecera del canal o para evitar los riesgos de contaminación de los cultivos en caso de un vertido en el río suministrador, entre otras razones.

El establecimiento de unos calados máximos es necesario para evitar inundaciones y pérdidas de agua innecesarias. Sin embargo la experiencia demuestra que un cierre abrupto de las compuertas del canal conlleva la generación de ondas que pueden producir grandes desbordamientos en el canal.

El almacenamiento del agua en el canal mediante el establecimiento de unos calados mínimos es necesario para evitar daños en la estructura del canal debidos al secado de la propia estructura o la subpresión sobre el fondo y los laterales del mismo. En ciertos casos el propio canal sirve también como depósito de agua potable de alguna población cercana por lo que el mantenimiento de un volumen mínimo en el mismo resulta de capital importancia.

El cierre de un canal en forma progresiva y suave evitando desbordamientos y manteniendo unos calados de seguridad en los diferentes tramos del mismo, dista mucho de ser un problema trivial y su solución requiere una enorme destreza y conocimientos de la hidráulica del canal y de las necesidades del mismo.

El control automático puede ayudar drásticamente en la solución de este problema. Una aplicación basada en control en lazo abierto, orientada a evitar la contaminación en el Canal de la Margen Izquierda del Delta del Ebro puede verse en la referencia [1], y en este estudio la definición de las trayectorias de compuerta necesarias para el cierre del canal en las condiciones y tiempos requeridos, se lleva a cabo mediante un algoritmo de optimización basada en la solución inversa de las ecuaciones de Saint-Venant. Esta técnica permite solucionar el problema, pero no sería capaz de reaccionar ante posibles perturbaciones que se produzcan durante el proceso de cierre.

Posteriormente se han llevado a cabo trabajos de investigación orientados a la solución del problema de cierre de un canal mediante control predictivo con realimentación. Los algoritmos desarrollados han sido validados en el canal de laboratorio PAC-UPC de 220 m de largo, disponible en el laboratorio de modelos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos de Barcelona. Los detalles sobre las características físicas y los detalles de implementación de dicho canal pueden verse en la referencia [2]. Previamente a su implementación en tiempo real los algoritmos de control han sido validados mediante el paquete de simulación SIC (Simulation of Irrigation Canals) desarrollado por IRSTEA, Francia.

### **Líneas de investigación.**

Las tareas de investigación que se proponen tienen como objetivo solucionar mediante un algoritmo de control predictivo con restricciones los problemas de cierre y apertura de un canal. Las podemos considerar divididas en tres bloques:

- Cierre del canal desde un estado de operación normal
- Apertura del canal desde un estado de cierre
- Integración de los dos controladores anteriores con un controlador automático orientado al riego a la demanda.

En definitiva, mediante las tres líneas de investigación se pretenden obtener resultados que mejoren de manera ostensible las maniobras de cierre y apertura en canales reales gestionados de forma automática, evitando los desbordamientos durante el cierre, y el mantenimiento de la integridad estructural del canal.

### **Referencias.**

[1] Soler, J., Gómez, M., Rodellar, J. "Estudio Hidráulico para el plan de emergencias del Canal de la Margen Izquierda del Delta del Ebro. Ingeniería del Agua

[2] Sepúlveda, C. "Instrumentation, model identification and control of an experimental irrigation canal". Tesis Doctoral . Universitat Politecnica de Catalunya. Octubre 2007 .



**LÍNEA PRIORITARIA C**  
**RIESGO ASOCIADO A LA ESCORRENTÍA URBANA**



## **Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo ante sucesos de lluvia extrema en entorno urbano**

**Eduardo Martínez<sup>(1)</sup>, Manuel Gómez<sup>(1)</sup>, Beniamino Russo<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> *Instituto FLUMEN – UPC. [eduardo.martinez-gomariz@upc.edu](mailto:eduardo.martinez-gomariz@upc.edu)*

<sup>(2)</sup> *Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia (EUPLA)*

### **Introducción.**

La hidrología urbana presenta características muy diferenciadas respecto a la rural, y principalmente son el elevado porcentaje de superficie impermeable y la existencia de una red de drenaje artificial con puntos localizados de entrada de agua (rejas de imbornales). De esta manera la cuenca urbana presenta coeficientes de escorrentía elevados, con las repercusiones que esto conlleva en el hidrograma de respuesta de la misma, y además de contar con el relieve superficial, se debe contar con la red de drenaje que puede no tener la misma pendiente o dirección de drenaje que el terreno.

Hoy en día se utiliza el concepto de resiliencia, como la habilidad de un sistema para resistir o acomodarse a las fuerzas y sobresaltos debidos a los impactos climáticos, mientras el sistema sigue manteniendo su función. Este concepto puede ser aplicado a la ciudad, denominándose así resiliencia urbana, y el impacto climático puede ser una lluvia de gran intensidad que genere inundaciones en zona urbana. Se trata de un concepto íntimamente relacionado a la gestión del riesgo en zona urbana, puesto que la maximización de la resiliencia urbana requiere una buena gestión del riesgo.

Otros conceptos como la vulnerabilidad y la peligrosidad forman parte del riesgo y deben ser analizados en detalle, para poder ofrecer herramientas de garantías que ayuden a realizar una correcta gestión del riesgo.

La tesis doctoral de Russo (2009) [1], “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban áreas”, en la que se dedica uno de sus capítulos a tratar el tema de peligrosidad en relación a inundaciones en zonas urbanas, es la base del presente trabajo y por tanto la referencia principal.

La base de este estudio fue experimental, utilizando para los ensayos un modelo físico construido en el laboratorio del Departamento de Ingeniería

Hidráulica, Marítima y Ambiental en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña [2]. Dicho modelo presenta unas dimensiones suficientemente importantes para garantizar que los efectos de escala no se produzcan, con un ancho de 1.6 m, longitud de 5.0 m y pendiente variable desde 0 a 10 %, habiendo elegido además unas dimensiones acorde con el espacio disponible en el laboratorio.

### **Líneas de investigación.**

Las tareas de investigación que se proponen tienen como objetivo ofrecer herramientas para el análisis de la “Peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo ante sucesos de lluvia extrema en entorno urbano”. Para ello se distinguen tres líneas principales de investigación:

Evaluación de la peligrosidad para personas ante inundaciones

Evaluación de la peligrosidad para vehículos

Evaluación de la vulnerabilidad de los bienes o propiedades ante peligrosidades

En definitiva, mediante las tres líneas de investigación se pretenden obtener resultados fundamentados que aporten información de gran valor para el objetivo final, la gestión del riesgo ante inundaciones en zonas urbanas.

### **Referencias.**

[1] Russo, B., “Design of surface drainage systems according to hazard criteria related to flooding of urban areas,” Thesis. Technical University of Catalonia, 2009.

[2] “Department of Hydraulic, Maritime and Environmental Engineering (EHMA).” [Online]. Available: <http://www.dehma.upc.edu/>.

## **Desarrollo de tuberías ovoides para la mejora de la eficiencia de las redes de alcantarillado**

**Juan Naves, Jose Anta, Jerónimo Puertas, Joaquín Suárez**

***Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente - GEAMA, Universidade da Coruña. [geama@geama.org](mailto:geama@geama.org)***

El predominio de las tuberías de forma circular en las redes de saneamiento se debe principalmente a cuestiones económicas y de facilidad en el proceso de fabricación y no a sus prestaciones hidráulicas. En los sistemas de saneamiento unitario, la principal ventaja de las secciones ovoides respecto a las circulares es su mayor rendimiento hidráulico en aguas bajas. En estas condiciones utilizar secciones ovoides incide positivamente en la autolimpieza del conducto, ya que se dan mayores velocidades y tensiones de arrastre debido al mejor aprovechamiento de la sección. De la misma forma, también mejora el comportamiento del tubo a efectos de agresión química y formación de biopelícula al reducir el perímetro mojado. Es pues a priori una tipología idónea para sistemas unitarios en los que un alto porcentaje del tiempo sólo se está utilizando la cubeta inferior del conducto.

El proyecto OVALPIPE, desarrollado por las empresas ABNpipe systems, EMALCSA y M.Blanco SL, con la colaboración de las universidades de A Coruña y Valladolid, pretende desarrollar una nueva serie de conducciones con forma ovoide en material plástico competitiva frente a los conductos circulares de diámetros comprendidos entre los 300 y 400 mm. El GEAMA está participando en las fases de definición geométrica de la sección ovoide y en la fase de validación experimental.

En este trabajo se presentarán los resultados previos de una serie de ensayos realizados en el Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) sobre una tubería circular de DN 315 mm de 12 m (PVC teja) y una sección ovoide equivalente (385 mm de alto y radios superior e inferior de 110 y 55 mm respectivamente) de 11 m de longitud construida en acero inoxidable. En los ensayos realizados se busca avalar con datos experimentales lo expuesto anteriormente. Para ello, y con ayuda del perfilador de velocidades DOP 2000, se han determinado los perfiles de velocidad por la sección central de las conducciones circular y ovoide (ver figura 1).



Figura 1. Tubería circular (izquierda) y ovoide (derecha) en el canal de ensayos.

A partir de los perfiles de velocidades medidos se determinó las velocidades y caudales medios, así como las tensiones tangenciales medias sobre todo el perímetro mojado. Los resultados obtenidos ajustan bien con las expresiones teóricas de Thorman-Frankle para la sección circular y con la ecuación de Manning para la sección ovoide. En las figuras 2 y 3 se muestran los perfiles de velocidad correspondientes a la tubería circular, y una comparación de los caudales y velocidades teóricos con los datos experimentales, también para el caso de la tubería circular.

### **Agradecimientos.**

Financiado CDTI a través del proyecto FEDER – ININTERCONECTA “Desarrollo de tuberías ovoides para la mejora de la eficiencia de las redes de alcantarillado-OVALPIPE” (Ref. ITC 20133052).

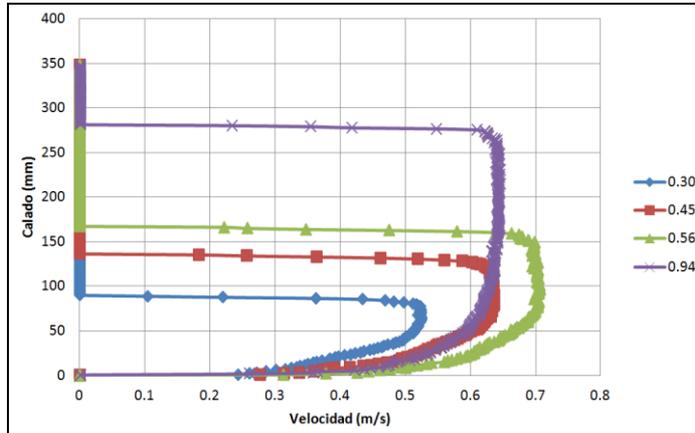


Figura 2. Perfiles de velocidad obtenidos para los grados de llenado ensayados con la sección circular.

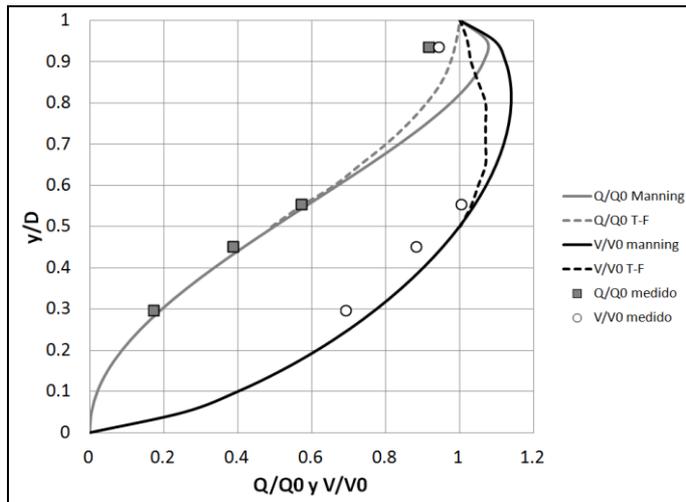


Figura 3. Relación teórica entre los caudales y el caudal a sección llena  $Q/Q_0$  –en gris– y la velocidad media y la velocidad media a sección llena  $V/V_0$  –en negro– para las expresiones de Manning y Thorman-Frankle (TF) para la tubería circular. Se han representado los datos de los ensayos con cuadrados y círculos respectivamente.



## **Análisis comparativo de las escorrentías producidas por una cubierta vegetada y una cubierta convencional**

**Carmen Hernández <sup>(1)</sup>, Beatriz Nácher <sup>(1)</sup>, Francisco J. Vallés <sup>(1)</sup>, Ignacio Andrés <sup>(1)</sup>, Miguel Martín <sup>(1)</sup>, Sara Perales <sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup> *Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. beanacro@cam.upv.es*

<sup>(2)</sup> *PMEnginyeria.*

En el marco del proyecto europeo Life08ENV/E/000099 Aquaval, se construye en Xàtiva un sistema urbano de drenaje sostenible (SUDS) consistente en una cubierta vegetada (Figura 1), con el objetivo de analizar la mejora que supone la implantación de este tipo de cubiertas en la calidad y cantidad de las escorrentías urbanas, en comparación con una cubierta convencional.



Figura 1. Cubierta vegetada (izquierda) y cubierta convencional (derecha).

La monitorización de los caudales circulantes por las bajantes que recogen la escorrentía formada en las cubiertas se lleva a cabo mediante aforadores de balancín, cuyos pulsos se registran en un data-logger con intervalos de acumulación de 1 minuto. Cada una de las bajantes dispone de un sistema de toma de muestras para los análisis de calidad, que incluyen materia orgánica (DBO5 y DQO total), sólidos suspendidos totales, turbidez, nitrógeno total y fósforo total. La monitorización de las cubiertas se lleva a cabo desde septiembre de 2012 hasta diciembre de 2013, registrándose un total de 17 eventos de precipitación que varían en magnitud, intensidad y duración.

Del análisis de los resultados obtenidos en el periodo considerado, se deduce desde el punto de vista de la cantidad que la cubierta vegetada presenta volúmenes drenados y caudales pico considerablemente menores que los generados por la cubierta convencional. La Figura 2 presenta la escorrentía generada por ambas cubiertas durante un evento de magnitud importante para el clima de Xàtiva (88 mm totales e intensidad máxima 10 minutal de 10.8 mm/h), donde se observa claramente como la cubierta convencional presenta picos de escorrentía mucho mayores que la cubierta vegetada. No obstante, se ha de tener en cuenta que la capacidad de almacenamiento de este tipo de infraestructuras depende del grado de saturación del suelo, por lo que las operaciones de riego sobre la misma, necesarias sobre todo en la fase de implantación de la vegetación, disminuyen su rendimiento. De hecho, el rendimiento volumétrico de la cubierta vegetada crece desde un 50% en los primeros meses de monitorización hasta más de un 90%, volviendo a disminuir notablemente durante los meses de verano, cuando vuelve a regarse la misma.

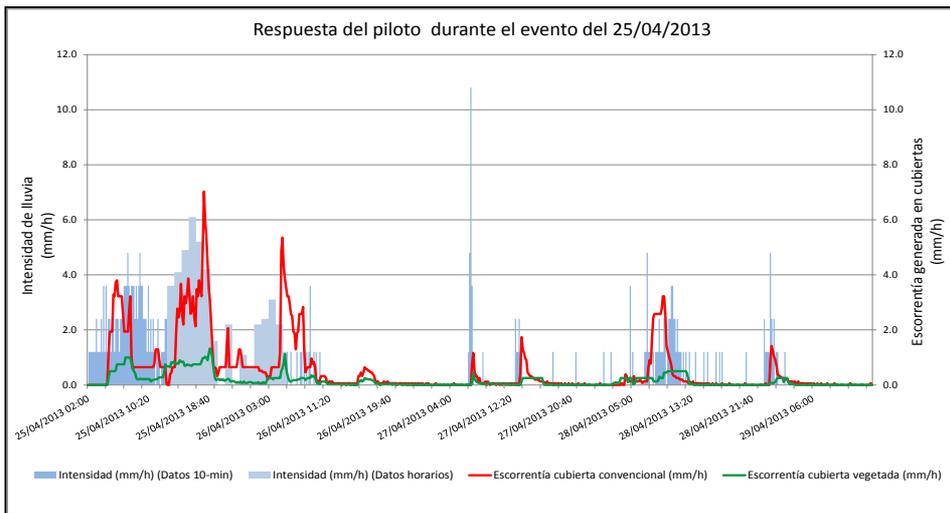


Figura 2. Escorrentías generadas por ambas cubiertas para el evento del 25/04/2013.

En cuanto a los resultados de calidad, se observan concentraciones altas de DQO, NT y PT en las muestras de la cubierta vegetada, superiores a las de la cubierta convencional, y asociadas a la materia orgánica presente en el sustrato empleado para el desarrollo de la vegetación. Esta materia orgánica, que es lentamente biodegradable y mayormente soluble, va disminuyendo a lo

largo del periodo monitorizado debido al lavado del sustrato, presentando una bajada importante a los 6 meses de implantación de la misma.

Como conclusión, se puede decir que el almacenamiento de agua en la cubierta vegetada es importante, pero es imprescindible adaptar el riego a las necesidades mínimas de la vegetación para no disminuir su capacidad. Asimismo, la correcta elección del sustrato es fundamental, ya que de su composición depende el contenido extra en materia orgánica y nutrientes que aporta la escorrentía drenada a la red, si bien éste va disminuyendo conforme se produce su lavado en sucesivos eventos de precipitación.



## **Herramienta de apoyo a la decisión para la mejora de la eficiencia energética en la gestión del agua de lluvia en ciudades mediterráneas**

**Adrián Morales <sup>(1)</sup>, Ignacio Escuder <sup>(1)</sup>, Ignacio Andrés <sup>(1)</sup>, Sara Perales <sup>(2)</sup>**

**<sup>(1)</sup> Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. [igando@hma.upv.es](mailto:igando@hma.upv.es)**

**<sup>(2)</sup> PMEnginyeria.**

La gestión del agua en los municipios es una de las actividades gestionadas por los gobiernos locales que requiere un mayor consumo energético, pudiendo representar entorno al 35% del consumo municipal. Por ello, es esperable que las mejoras en la eficiencia energética de la gestión del ciclo urbano del agua se traduzcan en una reducción importante del consumo energético municipal. En este sentido, el proyecto E<sup>2</sup>STORMED ([www.e2stormed.eu](http://www.e2stormed.eu)) está desarrollando una herramienta de apoyo a la decisión que permita introducir en la toma de decisiones el ahorro energético en el ciclo del agua urbano, con el uso de sistemas no tradicionales de gestión del agua de lluvia tales como los Sistemas de Drenaje Sostenible (SuDS). Estos sistemas representan una solución eficiente económicamente y flexible para los sistemas de drenaje (Escuder-Bueno et al, 2013) que puede disminuir el gasto en consumo energético mediante la reducción de los volúmenes de escorrentía tratados y bombeados, la reutilización de estas aguas y en el caso de cubiertas vegetadas, la mejora del aislamiento de los edificios (USEPA, 2013).

La herramienta de apoyo a la decisión desarrollada tiene dos partes diferenciadas. La primera consiste en obtener datos sobre costes, consumos energéticos y emisiones para cada una de las infraestructuras que componen cada una de las posibles estrategias de drenaje planteadas. Estos datos incluyen todos los beneficios, costes y consumos energéticos de cada estrategia de drenaje planteada, no solo en la gestión del agua, sino también medioambientales, en la protección frente a inundaciones y en el aislamiento de edificios. Para ello, se incluye un listado con 20 tipos de infraestructuras y de drenaje (convencionales y SuDS) y se proporcionan datos de referencia para cada una de ellas y para los diferentes consumos energéticos en el ciclo

del agua. La segunda parte consiste en utilizar los resultados anteriores como criterios económicos, energéticos y medioambientales que permitan realizar un análisis multi-criterio entre los diferentes escenarios planteados. Además, estos criterios pueden complementarse con otros criterios sociales, políticos medioambientales y paisajísticos, para obtener elementos que apoyen la toma de decisiones para la gestión del agua de lluvia.



Figura 1. Estructura de la herramienta de apoyo a la decisión desarrollada.

Actualmente se ha desarrollado la primera versión de esta herramienta y la versión final está prevista para finales de 2014. Con el fin de mejorar los datos introducidos en esta herramienta y asegurar su utilidad en la gestión del agua de lluvia en ciudades mediterráneas, está siendo aplicada en zonas urbanizadas y de nuevo desarrollo de 6 ciudades piloto: Pisa (Italia), Benaguasil (España), Cetinje (Montenegro), Zagreb (Croacia), Hersonisos (Grecia) y Zabbar (Malta). De esta forma, las propuestas y los datos de estas ciudades serán incluidos en la versión final de la herramienta.

De forma paralela al desarrollo de la herramienta, se ha creado en cada ciudad un grupo de trabajo regional en eficiencia energética en el ciclo del agua donde participan los principales agentes relacionados con la gestión del agua y la energía. Estos grupos están ayudando a recopilar los datos necesarios para el desarrollo de la herramienta y definir los criterios de decisión en cada uno de los casos de estudio.

**Referencias.**

USEPA. (2013). Green Infrastructures. United States Environmental Protection Agency <http://water.epa.gov/infrastructure/greeninfrastructure/>

Escuder-Bueno I., Andrés-Doménech I., Morales-Torres A., Perales-Momparler S. (2013) “Hacia una mejora de la eficiencia energética en la gestión del agua de lluvia en entornos urbanos: el proyecto E2STORMED”. III Jornadas de ingeniería del Agua. Vol. 2. 51-58 Marcombo SA, Barcelona, ISBN 978-84-267-2071-9.



## Caracterización de la acumulación y lavado de contaminantes en calzadas urbanas

**Carmen Hernández, Beatriz Nácher, Francisco J. Vallés, Ignacio Andrés, Miguel Martín**

***Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. carhercr@upvnet.upv.es***

La contaminación de escorrentías urbanas es uno de los problemas medioambientales más graves que se dan en entornos urbanos. Se presentan en esta comunicación los primeros resultados del análisis del proceso de acumulación y lavado en la superficie de la cuenca urbana, ciñendo el alcance al origen del sistema, esto es, al imbornal. El objetivo fundamental del proyecto es estudiar la importancia de la secuencia temporal en el proceso de acumulación y lavado de contaminantes en calzadas urbanas a escala de imbornal en condiciones climáticas semiáridas. Para ello, se ha llevado a cabo la monitorización y caracterización, en cantidad y calidad, de las escorrentías inmediatamente aguas abajo de un imbornal, en la acometida de éste a la red. La infraestructura construida junto al imbornal para albergar la instrumentación consiste en una arqueta con un vertedero triangular que junto con una sonda de nivel permiten el aforo del caudal desde el imbornal hacia la red. Los niveles registrados por la sonda son almacenados en continuo en un data-logger.



Figura 1. Dispositivo de aspiración aguas abajo del imbornal y automuestreador.

Las muestras fueron captadas con un automuestreador automático ISCO3270 (figura 1). La señal de consigna para el inicio de la toma de muestra viene determinada por el volumen de agua (2 litros) en el recipiente de 4 litros donde se ubica el tubo de aspiración. El número máximo de muestras en cada evento es de 24, cada una de ellas de un litro. La frecuencia de muestreo se fijó de la siguiente manera: las 10 primeras muestras cada 3 minutos, las 6 siguientes cada 5 y las 8 últimas cada 10 minutos. En función de las características del evento y de los eventos previos se decide si se procede al análisis de las muestras. En caso afirmativo, a partir de las medidas de conductividad y de apreciación visual de la turbidez en las 24 botellas, se analizan 12 o 6 botellas. Los análisis incluyen materia orgánica como DBO5, DBO20 y DQO, sólidos suspendidos totales (SS) y volátiles (SSV), nitrógeno total y fósforo total. Además, aunque no en todas las muestras, se está determinando la concentración de metales como plomo, cinc, níquel y cobre.

Los primeros resultados de los análisis muestran la magnitud de los aportes de contaminantes a la red de colectores y la distinta distribución temporal en función de la intensidad y duración del evento. También es significativa la diferencia entre los aportes en días laborables, en los que la circulación de vehículos por la rotonda es elevada, frente a los días festivos. En los siete eventos analizados, la DQO inicial ha oscilado entre 230 y 711 mg/L, mientras que las concentraciones iniciales de nitrógeno total entre 5.6 y 19.3 mg N/L y fósforo total entre 0.37 y 2.86 mg P/L. Mención especial cabe hacer de los metales analizados, cuyo elemento más abundante es el Pb (máximo de 6.04 mg/L), seguido de Ni y Cu, y el Zn el menos abundante (máximo de 0.67 mg/L). En la Figura 2 se puede observar la variación temporal de la DQO y de los SS en el evento del día 4/10/2013, que totalizó 14.4 mm en tan sólo 20 minutos, con una gran torrencialidad. Los resultados muestran unas concentraciones iniciales de DQO y SS muy elevadas, que disminuyen muy rápidamente. El lavado del pavimento es prácticamente completo.

El procesamiento próximo de los datos registrados permitirá determinar la carga de contaminantes que, por unidad de superficie pavimentada, se aporta desde este tipo de calzadas urbanas, constituyendo una información muy valiosa para la planificación urbana.

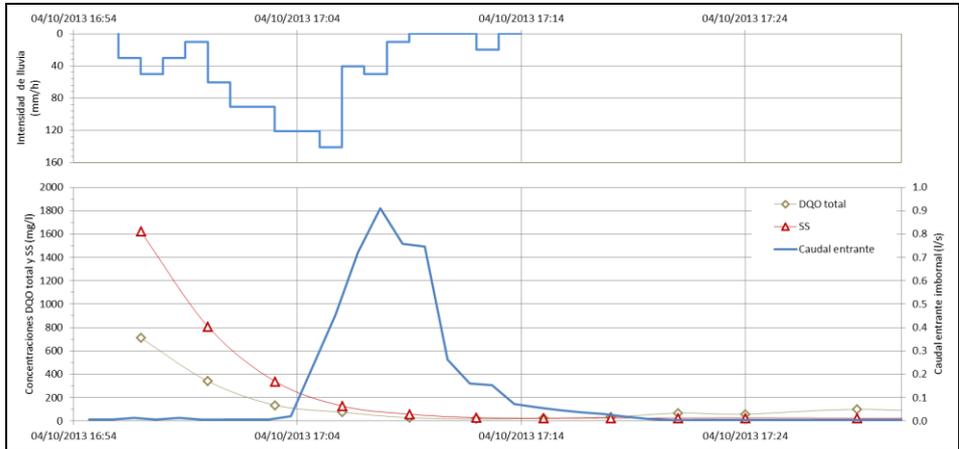


Figura 2. Hidrograma y concentraciones de SS y DQO total en el evento del 04/10/2013.



**LÍNEA PRIORITARIA D**

**SEGURIDAD DE PRESAS. ASPECTOS HIDROLÓGICOS E HIDRÁULICOS**



## Problemas de difusión numérica en SPH

**David López, Rubén Díaz**

***Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). david.lopez@cedex.es***

El método SPH (Smoothed Particles Hydrodynamic) se ha empleado con éxito en la simulación numérica de flujos hidrodinámicos de estructuras hidráulicas. CEDEX ha desarrollado un software propio, SPHERIMENTAL, que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes para flujo cuasi compresible, lo que obliga a emplear una ecuación de estado suficientemente rígida, que con velocidades del sonido suficientemente altas reproducen correctamente un flujo incompresible. Ese modelo tridimensional es la versión FORTRAN CUDA del modelo MDST (Grassa, 2004), también de desarrollo propio. Con este modelo se han realizado diversos trabajos de calibración, proporcionando muy buenos resultados (Grassa, 2007; López, 2010). Este software se emplea como herramienta complementaria a los trabajos de experimentación en modelación física, en los trabajos de asistencia técnica experimental (López, 2009; López 2013).

El método SPH es adecuado para el estudio de detalle de interacción de flujo con estructuras, impacto de chorros, trampolines de lanzamiento (Grassa, 2006; Gatti, 2007; Lee, 2010). Caracteriza correctamente el flujo y permite analizar la fuerza del impacto, campos de velocidad y de presión. Sin embargo, en simulaciones de régimen variable, se aprecia un amortiguamiento del movimiento. Las simulaciones resultan demasiado difusivas, reduciendo la energía cinética del flujo a cambio de aumentar la entropía del sistema.

Lobovsky (2013) presenta un test case basado en un “dam break”, que es muy adecuado para analizar este fenómeno, pues tras la apertura de compuerta se produce un oscilación longitudinal de la masa fluida dentro del recinto. El caso consiste en un depósito rectangular de 1.60 m de largo por 0.60 de alto y 0.15 de ancho, dentro del cual se aloja una compuerta que divide el depósito en dos cámaras reservando 0.60 para situar inicialmente el agua. Se han realizado dos experimentos con diferente altura de carga de agua de 0.30 m y 0.60 m de altura de carga. Lobovsky (2013) describe los experimentos con gran detalle.

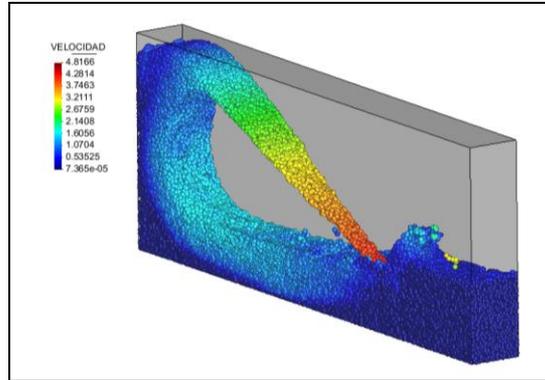


Figura 1. Simulación SPH de un dam break.

De acuerdo con la primera ley de la termodinámica, para un fluido compresible se cumple la siguiente relación de conservación de la energía:

$$TdS = du + PdV \quad (1)$$

Donde S es la entropía, du es la variación de la energía interna, P es la presión y dV es el cambio de volumen, expresado en cantidades por unidad de masa.

En un sistema sin aportación de calor externo, se debe cumplir que el trabajo realizado al comprimirse el fluido se transforma en energía interna.

$$du = -PdV = -\frac{P}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{P}{\rho^2} \text{div} \bar{v} \quad (2)$$

El método SPH para fluidos cuasi-compresibles asume que el trabajo realizado por el fluido al comprimirse es despreciable, lo cual puede ser asumible en algunos casos. De hecho, los primeros instantes de las simulaciones del test case dam break son representativos, pero a medida que pasa el tiempo se aprecia una excesiva amortiguación del movimiento.

La expresión (3) de la derivada de la energía interna del sistema debido al trabajo realizado por el fluido al comprimirse, Monaghan (2005).

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{P_a}{\rho_a^2} \sum_b m_b \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} \quad (3)$$

La corrección propuesta consiste en realimentar el flujo devolviendo en forma de energía cinética la energía interna por el trabajo realizado al comprimirse el fluido, de acuerdo con la expresión de la ecuación (4).

$$\Delta v = C_{ucorr} \sqrt{\frac{du}{dt} \frac{dt}{\rho}} \quad (4)$$

En esta expresión se incluye un coeficiente corrector que permite ajustar la cantidad de energía cinética que realimenta el flujo para eliminar los efectos difusivos, que es mayor cuanto mayor sea el tamaño de partícula.

### Referencias.

- [1] Grassa, JM. 2004. El método SPH. Aplicaciones en ingeniería marítima. Revista de ingeniería civil, 133.
- [2] Lee, E.-S., Violeau, D., Benoit, M., Issa, Ploix, E. 2010. Application of weakly compressible and truly incompressible SPH 3D water collapse in waterworks. Journal of Hydraulic Research. Vol 48. pp. 50-60. Extra Issue. ISSN: 0022-1686.
- [3] Lobovsky, L., Botia-Vera, L. E., Castellana F., Mas-Soler J., Souto-Iglesias, A. 2013. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break. Journal of Fluids and Structures, arXiv:1308.0115v1.
- [4] López, D., Marivela, R., Garrote L. 2010 "Smooth Particle Hydrodynamics Model Applied To Hydraulic Structures: A Hydraulic Jump Test Case". Journal of Hydraulic Research. Vol 48. , Extra Issue. pp. 142-158. ISSN: 0022-1686.
- [5] Monaghan, J.J. 2005. "Smoothed Particle Hydrodynamics" .Reports on Progress in Physics, 68, 1703-1759.
- [6] Gatti, D., Maffio, A., Zuccalà, D., Di Monaco, A. 2007. SPH Simulation of Hydrodynamics Problems Related To Dam Safety. Proceedings of 32nd Congress of IAHR. CD-Rom. Paper 2, SS09. Venice. Italy.
- [7] Grassa, JM. 2007. Wave forces on a wavemaker. SPH simulation and comparison with analytic results. Proceedings 32nd Congress of IAHR, the International Association of Hydraulic Engineering & Research. Venice 1-6 de Julio, v. I, 2007. P. 100. ISBN 88-89405-06-6.
- [8] López, D., Marivela, R., Aranda F. (2009) "Calibration of SPH model using prototype pressure data from the stilling basin of the Villar del Rey dam, Spain". Proceedings of 33rd Congress of IAHR. Water Engineering for a Sustainable Environment The International, Vancouver 9-14 de agosto de 2009, ISBN: 978-90-78046-08-0.



## Implicaciones de la modelación hidrológica en la seguridad de presas

**Álvaro Sordo, Paola Bianucci, Luis Garrote**

***Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética, Universidad Politécnica de Madrid. [alvaro.sordo.ward@upm.es](mailto:alvaro.sordo.ward@upm.es)***

En este trabajo se estudió el efecto de diferentes factores utilizados en la modelación hidrológica sobre la seguridad hidrológica de presas (para altos períodos de retorno ( $Tr$ )). En la práctica habitual se utilizan hietogramas sintéticos, generalmente con un solo pico como los que proporciona el método de bloques alternos, y se aplican a un modelo hidrológico semidistribuido basado en eventos. En este trabajo, para la cuenca de Manzanares y Mediano, se estudió el efecto que sobre la ley de frecuencia ( $100 < Tr < 10,000$  años) de caudales punta ( $Q_{max}$ ) tienen: a) la forma del hietograma de diseño definido según el método de bloques alternos (BA) o con un procedimiento de Monte Carlo (MC), b) el área de la cuenca de aporte (variando entre 140 y 1,800 km<sup>2</sup>) y c) el grado de desagregación del modelo hidrometeorológico (variando entre 14 y 66 subcuencas). Cada cuenca estudiada se desagregó según tres resoluciones y para cada resolución se seleccionaron puntos de evaluación sobre el cauce principal. En cada uno se aplicó un modelo hidrometeorológico semidistribuido basado en eventos a partir de hietogramas estimados para cada subcuenca según un generador estocástico basado en un procedimiento de MC y el método de BA. Para cada resolución y punto de evaluación, se determinaron las curvas de frecuencia de  $Q_{max}$  para altos  $Tr$ . El efecto sobre el factor de seguridad hidrológica adicional que se asume brinda el método BA se midió utilizando el ratio  $R = Q_{maxBA}/Q_{maxMC}$ , siendo  $Q_{maxBA}$  los caudales máximos obtenidos con el método de BA y  $Q_{maxMC}$  aplicando MC. Los resultados muestran que: a) el grado de seguridad adicional ( $R$ ) disminuye a medida que aumenta el área de la cuenca de aporte, independientemente del grado de desagregación del modelo utilizado, b) un mayor grado de desagregación de los modelos hidrológicos semidistribuidos conduce un mayor grado de seguridad hidrológica, principalmente para cuencas con áreas totales menores (en este estudio 150 km<sup>2</sup>), c) la forma de los hietogramas influye en la pendiente de la curva de frecuencia de caudales máximos, principalmente para las menores áreas de aporte estudiadas y d) a nivel de subcuenca, el grado de seguridad hidrológica disminuye a medida que aumenta el tiempo de

concentración y el área de la misma. Este trabajo pone de manifiesto que el factor de seguridad adicional que se admite habitualmente en los estudios hidrológicos por el uso de métodos con un pico como tormenta de diseño, varía en función de las características de la cuenca y el modelo hidrometeorológico utilizado.

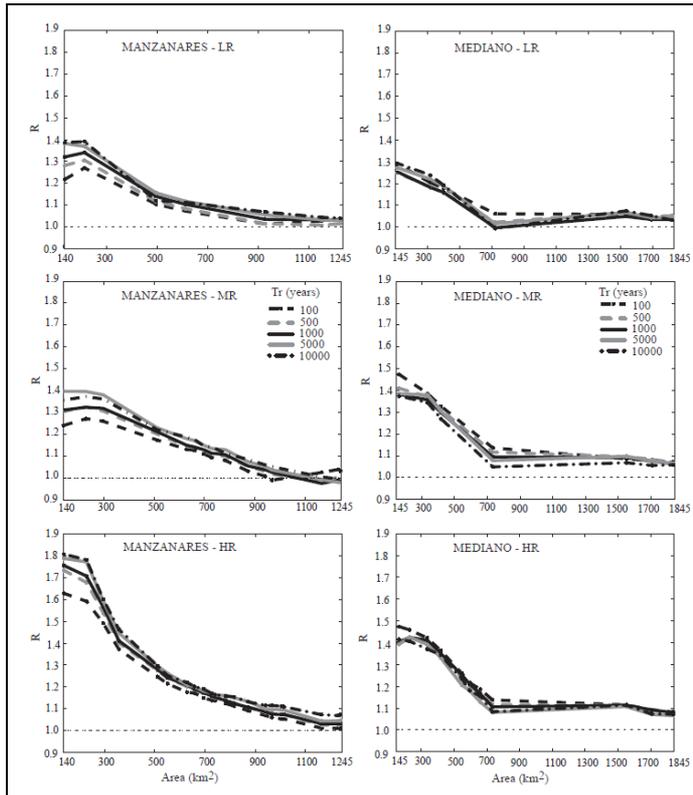


Figura 1. Relación entre el ratio R (definido como  $Q_{m\acute{a}x}$  obtenido utilizando tormentas definidas con el método de bloques alternos y el  $Q_{m\acute{a}x}$  obtenido utilizando un procedimiento de Monte Carlo) y el área de la cuenca para diferentes grados.

## **Caracterización del resalto hidráulico aireado en canales pequeños**

**Daniel Valero, Francisco J. Vallés, Rafael García, Ignacio Andrés, Juan Marco.**

***Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente. Universitat Politècnica de València. [davahue@upv.es](mailto:davahue@upv.es)***

Uno de los elementos estructurales que limita la capacidad de descarga de los aliviaderos de presa son los cuencos de amortiguación, que es la principal estructura hidráulica dedicada a la disipación de energía. En muchos de los cuencos de amortiguación el flujo de entrada se encuentra emulsionado, dando lugar esta mezcla agua-aire a unas distribuciones de cantidad de movimiento distintas a las del flujo solo agua. El movimiento de las burbujas dentro del flujo, provoca al mismo tiempo unos reajustes muy significativos de la turbulencia dentro de la fase portante.

En este estudio se ha ensayado, en un canal preparado al efecto, resaltos hidráulicos con un rango de números de Froude del flujo equivalente entre 3,5 y 16 y concentraciones entre 0 y 0,5.

Entre los resultados estudiados se encuentran la relación de calados conjugados y la longitud de resalto. La concentración de aire en el flujo provoca una reducción de la relación de calados conjugados (figura 1). Al mismo tiempo, la longitud de resalto (figura 2) no muestra una variación clara respecto a los resultados previos con resaltos hidráulicos no aireados.

Se puede concluir por lo tanto, que a pequeña escala, el resalto hidráulico aireado presenta mejores propiedades disipativas sin un aumento de la longitud de resalto. Sin embargo, es necesario el estudio a una escala mayor para determinar como la reducción de los efectos de escala y los reajustes en la turbulencia multifase modifican estas propiedades disipativas del resalto hidráulico aireado.

### **Agradecimientos.**

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "EL USO DE LA AIREACIÓN FORZADA DEL FLUJO EN RÁPIDAS COMO

EXTENSIÓN DEL CAMPO DE UTILIZACIÓN DE LAS OBRAS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA A PIE DE PRESA MEDIANTE RESALTO HIDRÁULICO” (BIA2011-28756-C03-01), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y por fondos FEDER de la Unión Europea.

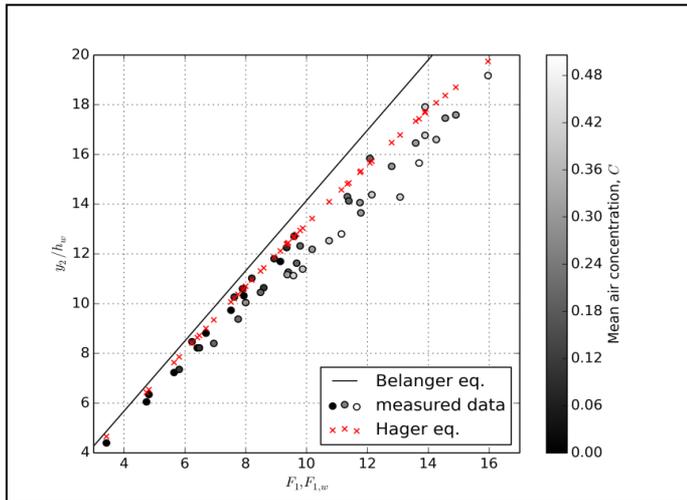


Figura 1. Relación de calados conjugados para los ensayos realizados.

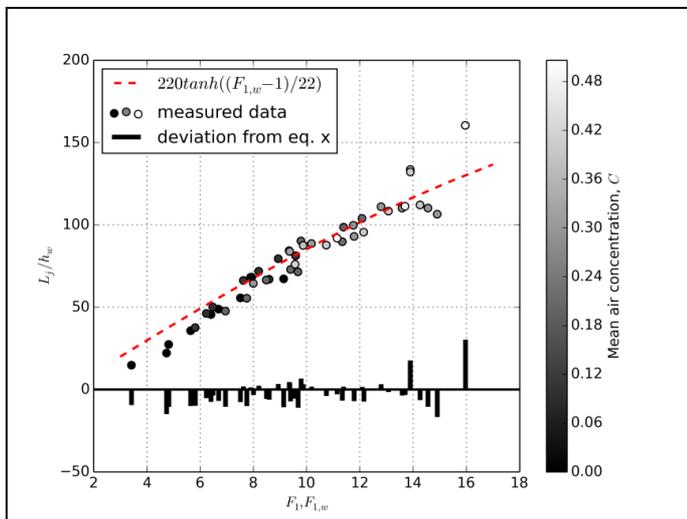


Figura 2. Longitud de resalto. Representado en barras el error respecto a la formulación propuesta.

## Comparación de resultados de laboratorio y simulaciones numéricas. Estudio de resaltos hidráulicos

Luis G. Castillo, José M. Carrillo, Juan T. García, Antonio Viguera

*Grupo I+D+i Hidr@m. Universidad Politécnica de Cartagena. UPCT.  
jose.carrillo@upct.es*

El resalto hidráulico es uno de los mecanismos más empleados para la disipación de energía hidráulica. Por lo general, las características del resalto hidráulico han sido analizadas por medio de modelos físicos. Actualmente, los programas de dinámica de fluidos computacional (CFD) son una herramienta que puede ayudar a analizar y entender fenómenos complejos que involucran alta turbulencia y flujos bifásicos aire-agua.

En este trabajo se analizan resaltos hidráulicos libres y sumergidos con diferentes números de Froude, obtenidos en un canal rectangular aguas abajo de una compuerta plana. Las mediciones de velocidad se llevan a cabo mediante el uso de equipos Acoustic Doppler Velocímetro (ADV) y Particle Image Velocimetry (PIV).

Las mediciones de laboratorio se utilizan para calibrar y validar programas de CFD comerciales (ANSYS CFX y FLOW-3D) y de código abierto (OpenFOAM). El flujo bifásico aire-agua es considerado en las simulaciones. El problema de cierre se resuelve mediante el uso de modelos de turbulencia de disipación viscosa.



Figura 1. Resalto hidráulico obtenido en laboratorio y equipo ADV.

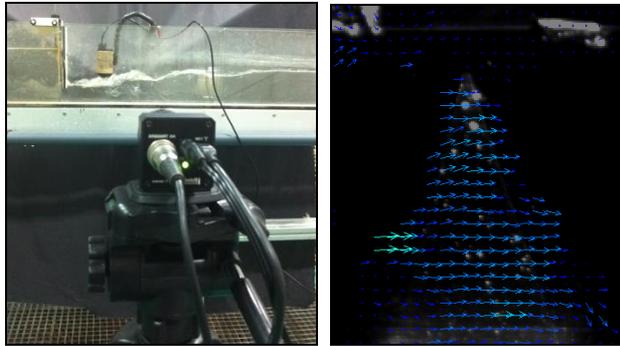


Figura 2. Equipo PIV en resalto hidráulico.

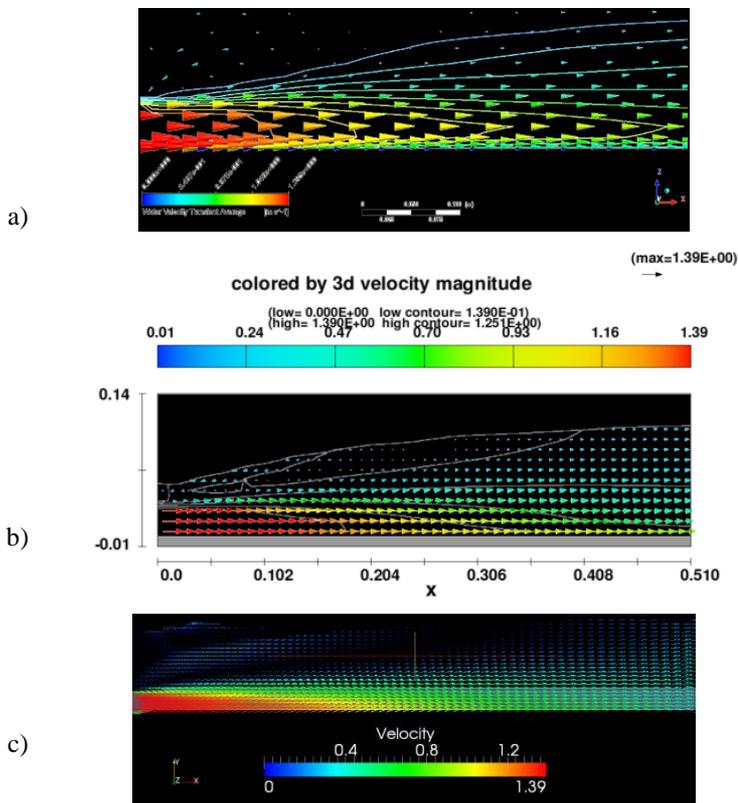


Figura 3. Vectores de velocidad en resalto sumergido obtenidos con CFD: a) ANSYS CFX, b) FLOW-3D, c) OpenFOAM.

En el estudio se comparan los calados aguas arriba y aguas abajo del resalto, la longitud del resalto hidráulico, los perfiles de velocidad y las tasas de disipación de energía de las simulaciones numéricas, las mediciones de laboratorio y resultados obtenidos de la bibliografía.

### **Referencias.**

ANSYS, Inc., "ANSYS CFX. Solver Theory Guide. Release 13.0.", (2010).

Castillo, L. G., "Validation of instantaneous velocities measurements with ADV equipment in turbulent high two-phase flows", The Eight International Conference on Hydro-Science and Engineering (ICHE), Nagoya, Japan, (2008).

Castillo, L. G., "Filtering and validation of velocities obtained with ADV equipment inside of hydraulic jumps", International Workshop on Environmental Hydraulics, Valencia, Spain, (2009).

Castillo, L. G., Carrillo, J. M., and Sordo-Ward, A., "Simulation of overflow nappe impingement jets", Accepted for publication in the Journal of Hydroinformatics, (2014).

Etalon Research Ltd., "Manual for the rtCam PIV system. Version 1.3", (2009).

FLOW Science, Inc., "FLOW 3D. Theory v10.0", (2011).

Nortek AS, "Nortek 10 MHz Velocimeter. Operations Manual", (2000).

OpenFOAM Foundation. "OpenFOAM. The Open Source CFD Toolbox. User Guide", (2013).



## **Instrumentación del modelo físico LS-Emulsion**

**Rubén Díaz, David López**

***Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX). [ruben.diaz@cedex.es](mailto:ruben.diaz@cedex.es)***

En nuestro país existen multitud de presas en la que resulta evidente la necesidad de revisión de la capacidad hidráulica de los órganos de desagüe para adaptarlas a los nuevos requerimientos surgidos con la aprobación del reglamento del año 1996 o más aún, para adaptarlas a las futuras Normas Técnicas de Seguridad (NTS) de Presas y Embalses, en fase de aprobación actualmente. En las soluciones de aumento de capacidad de desagüe de los aliviaderos de las presas de gravedad vertedero, la parte más delicada y compleja desde el punto de vista técnico es la relativa a la obra de disipación de energía. Esta parte es también la más costosa económicamente y en plazo de ejecución. En este contexto se plantea el uso de la aireación forzada del flujo supercrítico en la rápida como medida general de actuación para mejorar el funcionamiento hidráulico de las obras de disipación de energía de pie de presa preexistentes, en el caso de este subproyecto para el caso de cuencos de amortiguamiento, todo ello frente a caudales superiores a los de diseño, facilitando su adaptación a los nuevos requerimientos.

La aireación artificial, además de disminuir o minimizar el riesgo de daños por cavitación, aumenta el calado del flujo y le hace perder velocidad. Por esto disminuye el número de Froude, generándose unas condiciones de entrada al cuenco menos exigentes para caudales mayores a los de diseño. Este es el hecho que hace posible extender el campo de aplicación de los cuencos y permite la utilización de una determinada obra para caudales mayores, objetivos ambos de este proyecto de investigación.

Así, el objetivo fundamental del proyecto LS-Emulsion es la ampliación del campo de aplicación de los cuencos tipificados de resalto, extendiendo su uso a presas de mayor altura así como a condiciones de flujo de entrada más restrictivas.

La fase experimental se aborda en dos etapas. Una primera en modelo físico, mediante la adaptación de las instalaciones existentes en el Laboratorio y la construcción de nuevos elementos, dando lugar en su conjunto a un modelo de escala 1:1 que permitirá condiciones de caudal y velocidad de flujo y de aireación natural y forzada en la rápida que posibiliten el estudio a realizar

(figura 1), una segunda etapa para la realización de simulaciones mediante modelos matemáticos utilizando técnicas avanzadas de mecánica de fluidos computacional, y con los correspondientes contrastes numérico-experimentales.

El modelo físico se compone de una impulsión de un caudal de aire con capacidad de hasta 300 l/s, y una instalación de aire comprimido que permite la incorporación de aireación artificial al flujo en una gama de caudales y presiones. El flujo es soltado en una rápida a una altura de 6,5m, alcanzado velocidades del orden de 15 m/s. La pieza final de la conducción antes del vertido, es una pieza rectangular que permite variar la altura de la sección, lo que posibilita variar el calado del flujo y su velocidad, para un mismo caudal. Además, en el final del resalto proyectado, que tiene una longitud total de 9,5m, se dispone una compuerta que hace de azud de salida del cuenco, y que permite variar su altura imponiendo las condiciones de calado que se deseen.

En relación a la instrumentación para caracterizar las condiciones de entrada, se disponen caudalímetros y sensores en la conducción de aire y agua antes de producirse la mezcla, para conocer las condiciones de entrada de caudal y presión de ambas fases. Se puede variar su valor mediante válvulas y un regulador de presión para el aire.

En lo que respecta a la instrumentación para caracterizar el flujo emulsionado y su influencia en el comportamiento del resalto, se disponen:

- Estructura de decantación (figura 2) a la que se deriva de forma continua una muestra del flujo aireado tomado de la rápida (mediante una pieza dispuesta en la dirección del flujo y conducto de derivación), y que permite la separación de las fases agua y aire. Mediante la instalación de un caudalímetro de agua y otro de aire, se pueden aforar los caudales de las dos fases y obtener el valor de la concentración de aire en la rápida para cada ensayo, lo que es crítico para la caracterización del mismo. Para la toma de medidas, es necesario que se produzca un régimen uniforme en el interior de la estructura, para lo que se dispone de un desagüe para la evacuación del caudal líquido y de un sistema de válvula automática, gobernada por el comportamiento de la variación del calado dentro de la estructura, el cual se controla a su vez por medio de un limnómetro de ultrasonidos. Además se disponen de sensores de presión en la parte superior e inferior del depósito y un piezómetro para saber la presión del aire dentro del depósito. Para la medida del caudal de aire, se emplean dos sistemas diferentes: medida

mediante caudalímetros de aire dispuestos en una chimenea situada en la parte superior (se emplean diferentes caudalímetros, para diferentes rangos y para el contraste de resultados), y medida mediante la fórmula gasto en una tobera de salida de un depósito (con diámetro de salida de 1mm).

- Estructura para la disposición de una sonda ADV para la medida del perfil de velocidades en las secciones de estudio del cuenco.
- Sensores de presión a lo largo del eje de todo el cuenco.

Así, se realizarán ensayos variando el caudal entrante de agua y aire (considerando también la situación de aireación natural, con aportación 0 de aire) y la velocidad del flujo, obteniendo como resultado para cada uno de ellos, la concentración de aire y la energía resultante en el cuenco, estimada por el perfil de velocidades en las secciones características y la distribución de presiones a lo largo del mismo (para cada grupo de ensayos comparables, se definirá un altura de compuerta de salida del cuenco). Con todo ello se podrá estimar la variación del comportamiento energético del cuenco para condiciones homogéneas pero diferentes concentraciones de aire.



Figura 1. Modelo físico LS-Emulsion.



Figura 2. Sistema para la medida de la concentración de aire en la rápida.

### **Agradecimientos**

Este trabajo se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación "ESTUDIO DE LA AIREACIÓN NATURAL Y FORZADA EN MODELO FÍSICO DE GRANDES DIMENSIONES Y ANÁLISIS DE SU INFLUENCIA EN EL FUNCIONAMIENTO DE LOS CUENCOS DE RESALTO HIDRÁULICO (LS-EMULSION)" (BIA2011-28756-C03-03), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.