

---

# REVISTA HIDROLATINOAMERICANA DE JÓVENES INVESTIGADORES Y PROFESIONALES

---

**Volumen 2 – 2018**  
**ISSN: 2520-2960**



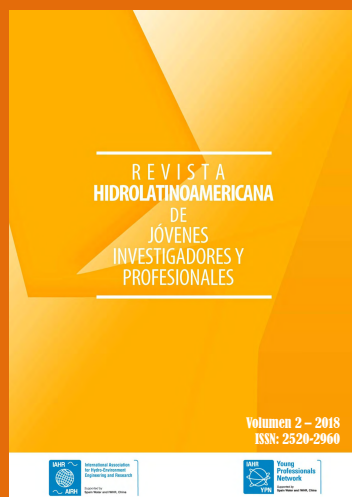
International Association  
for Hydro-Environment  
Engineering and Research

Hosted by  
Spain Water and IWHR, China



Young  
Professionals  
Network

Hosted by  
Spain Water and IWHR, China



**Revista Hidrolatinoamericana  
de Jóvenes Investigadores y  
Profesionales**

**ISSN: 2520-2960 (digital)**

**Mayo de 2018**

**Director y Editor**

**José M. Carrillo**

**Editores Asociados**

**Edwin Y. Saavedra Cifuentes  
Juan Naves García-Rendueles  
Juan T. García Bermejo  
Patricio Ortega Lara  
Tiago João Fazerres Ferradosa**

**Edita**

**International Association  
for Hydro-Environment  
Engineering and Research**

**iahr@iahr.org**

**www.iahr.org**

**Madrid Office:**

**Paseo Bajo Virgen del Puerto 3,  
28005 Madrid, SPAIN  
Tel. +34 91 335 7908**

**Beijing Office:**

**A-1 Fuxing Road, Haidian  
District, 100038 Beijing, CHINA  
Tel. +86 10 6878 1808**

**Spain Water and IWHR, China  
support the IAHR  
offices in Madrid and Beijing.  
IAHR is hosted by SUEZ and  
Hydromodelhost.**

## Sumario

- i Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)
- ii Sobre la revista
- iii Comité Editorial
- 1 Topografía de un modelo físico de drenaje urbano a partir de la técnica fotogramétrica Structure from Motion / Topography of a drainage physical model with the photogrammetric technique Structure from Motion  
(Regueiro-Picallo, M.; Naves, J.; Sañudo, E.; Anta, J.; Puertas, J.; Suárez, J.)
- 4 Cuantificación de la retención de nitrato usando un modelo hidrodinámico en el humedal Abras de Mantequilla, Ecuador / Quantification of the nutrient regulation functions using a hydrodynamic model in the Abras de Mantequilla wetland, Ecuador  
(Minaya V.; Batdelger O.; van Griensven A.; Dastgheib A.; Arias-Hidalgo M.; Alvarez-Mieles G.; Mynett A.E.; Spiteri C.)
- 8 Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Estudo de Caso: Sistema de Abastecimento de Água de Arouca / Operational Management of Hydraulic Infrastructures. Case Study: Arouca Water Supply System  
(Cardoso-Gonçalves, J.; Tentúgal-Valente, J.)
- 12 Simulación LES de flujos turbulentos: el clásico ejemplo del flujo alrededor de un cilindro / Large Eddy Simulations of turbulent flows: the classic case of a flow over a cylinder  
(Ramos, P.X.; Bento, A.M.; Pêgo, J.P.)
- 15 Diagnóstico y control de inundaciones en el río Villeta / Flood risk assessment and control in the Villeta River  
(Sanabria Morera A.C.; Sandoval-Pabón R.L.)
- 19 Caracterización de curvas de gasto en desagües profundos de presas mediante modelado CFD / Characterization of rating curves in dam bottom outlets using CFD modeling  
(Bayón, A.; Macián-Pérez, J.F.; Río, F.; Conesa, F. J.; García-lorenzana, D.)
- 22 Análisis de las características de la precipitación estimada mediante reanálisis en la Macrocuenca Magdalena-Cauca (McMC), Colombia / Analysis of precipitation features estimated by reanalysis datasets in the Magdalena Cauca Macrobasin, Colombia  
(Duque-Gardeazábal N.; Zamora D.; Vega-Viviescas C.; Arboleda P.; Rodríguez E.)
- 26 Caracterización de presiones en cuencos de disipación de aliviaderos de vertido libre / Characterization of pressures in plunge pools in free discharge spillways  
(Marco F.; Castillo L.G.)
- 29 Evaluación de la Cuenca subterránea Vento con el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP) / Evaluation of the Vento groundwater Basin with the model Water Evaluation and Planning system (WEAP)  
(Sánchez, Y.; Méndez, O.; Hernández A.)

## Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)

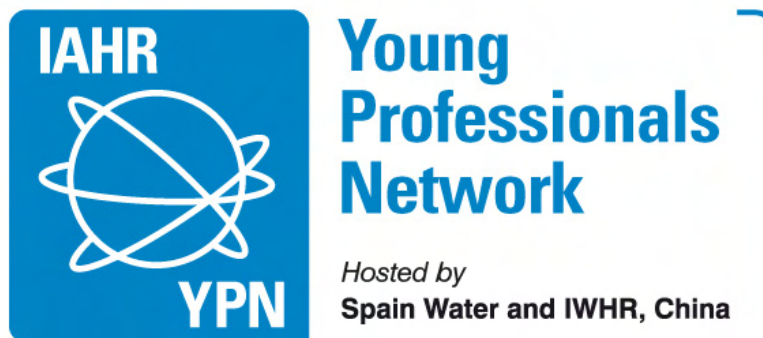
La Asociación Internacional de Ingeniería e Investigación Hidro-ambiental (IAHR), fundada en 1935, es una organización mundial e independiente, de ingenieros y científicos trabajando en el ámbito del AGUA -continental y marítima- y en el de su medio ambiente asociado. Las actividades van desde hidráulica fluvial y marítima a desarrollo de los recursos agua y eco-hidráulica, incluidas la ingeniería de hielo, hidroinformática y maquinaria hidráulica.

Los objetivos de la División Latinoamericana son, con carácter general los de la IAHR y específicamente, promover, en Latinoamérica, la difusión del conocimiento, la investigación, el desarrollo y la innovación en el ámbito del agua y de su medio ambiente asociado, tanto en el dominio de las continentales como en el de las marítimas.

La IAHR apoya la educación y el desarrollo profesional de futuros ingenieros y científicos en la comunidad hidráulica. A través de las Redes de Jóvenes Profesionales (Young Professional Networks, YPN) de la IAHR, jóvenes profesionales y estudiantes se reúnen para compartir experiencias, desarrollar proyectos singulares y participar en las actividades de la IAHR como el congreso mundial bienal, aprovechando la oportunidad para aprender de otros miembros de la IAHR y crear una red útil para sus futuras carreras. Las actividades de los Jóvenes Profesionales incluyen:

- Seminarios de investigación, foros de discusión y talleres.
- Excursiones para visitar obras hidráulicas locales.
- Proyectos de investigación de grupo.
- Viajes de grupo a simposios, talleres y congresos de la IAHR.
- Colaboración informal con las Redes de Jóvenes Profesionales vecinas.
- Recaudación de fondos para la participación de los miembros en congresos de la IAHR y otros foros.
- Solicitud para albergar uno de los congresos/foros de la IAHR.
- Hermanamiento.

En la actualidad, la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR) cuenta con 21 grupos de Redes de Jóvenes Profesionales (YPN), con presencia en 7 países.



## Sobre la revista

La Revista Hidrolatinoamericana de Jóvenes Investigadores y Profesionales es una revista de los Young Professional Networks de Latinoamérica.

Nace a partir del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, celebrado en Lima (Perú) con el fin de fomentar la colaboración entre los grupos Latinoamericanos de Jóvenes Profesionales de la IAHR.

Sus objetivos son:

- Generar un entorno de comunicación entre socios YPN.
- Incrementar la visibilidad de los jóvenes dentro de la IAHR.
- Fomentar la participación de los jóvenes en congresos internacionales y publicaciones en revistas de prestigio internacional (RIBAGUA, JHR, JAWER, etc).

Pensamos que esta revista de publicación anual es una gran oportunidad para que los Jóvenes Investigadores y Profesionales puedan difundir sus actividades, aportando a la comunidad Latinoamericana de Hidráulica una panorámica de la investigación y los trabajos singulares que se realizan en sus distintos centros.

Las contribuciones originales serán de carácter científico-técnico en uno de los ámbitos de la IAHR. La contribución puede ser científica, técnica o presentar una solución innovadora a un problema de ingeniería. Para su envío, deberán ser redactadas en español o portugués, con una longitud de 3 páginas.

Las instrucciones de estilo y formato pueden descargarse de la plantilla de Microsoft Word en el enlace situado en la página web de la IAHR (<https://www.iahr.org/site/cms/contentCategoryView.asp?category=388>).

Todas las contribuciones se someterán a un proceso de revisión anónima por pares, la cual indicará si el artículo continúa su proceso de publicación o si los autores deben hacer cambios de cara a su publicación final.

Agradecemos el apoyo del comité científico que realiza un esfuerzo en dotar a esta publicación de calidad con el objetivo de darle prestigio a los trabajos, ser indexada la publicación y alcanzar un elevado nivel de clasificación y de citas.



## Comité Editorial

**Editor:** José M. Carrillo

### **Editores asociados (por grupos YPN)**

**IAHR Bogota Young Professionals Network**  
D. Edwin Y. Saavedra Cifuentes

**IAHR Portugal Young Professionals Network**  
D. Tiago João Fazerres Ferradosa

**IAHR Escuela Politécnica Nacional Young Professionals Network**  
D. Patricio R. Ortega Lara

**IAHR South East Spain Young Professionals Network**  
D. Juan T. García Bermejo

**IAHR Galicia Young Professional Network**  
D. Juan Naves García-Rendueles

## **Comité Científico**

Dña. Andreia Moreira  
*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal)*

D. Leonardo Donado  
*Universidad Nacional de Colombia (Colombia)*

D. Arnau Bayón  
*Universitat Politècnica de València (España)*

D. Marco Castro D.  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Bruno Oliveira  
*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal)*

Dña. María Bermúdez Pita  
*Universidade da Coruña (España)*

D. Daniel Valero  
*RWTH Aachen University (Alemania)*

Dña. Maria Cristina Arenas Bautista  
*Universidad Nacional de Colombia (Colombia)*

D. Edgar L. Villareal  
*Universidad Nacional de Colombia (Colombia)*

Dña. Odalys Mendez Valdes  
*Aguas de La Habana (Cuba)*

D. Edwin Casa Tipán  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Pablo Vera  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Guilherme Paredes  
*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal)*

D. Tiago João Fazerres Ferradosa  
*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Portugal)*

D. José M. Carrillo  
*Universidad Politécnica de Cartagena (España)*

D. Xavier Zapata  
*Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)*

D. Juan Naves García-Rendueles  
*Universidade da Coruña (España)*

D. Yoany Sánchez Cruz  
*Aguas de La Habana (Cuba)*

D. Juan T. García  
*Universidad Politécnica de Cartagena (España)*

Revista Hidrolatinoamericana publica bajo la licencia





# Topografía de un modelo físico de drenaje urbano a partir de la técnica fotogramétrica Structure from Motion

## *Topography of a drainage physical model with the photogrammetric technique Structure from Motion*

(Recepción 30/01/2018; Aceptación 05/03/2018)

Regueiro-Picallo, M.<sup>1</sup>; Naves, J.<sup>1</sup>; Sañudo, E.<sup>1</sup>; Anta, J.<sup>1</sup>; Puertas, J.<sup>1</sup>; Suárez, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade da Coruña, Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA), A Coruña, España

Teléfono: +34 881 015 411

Email: manuel.regueiro1@udc.es

**Resumen.** Las técnicas de visualización se presentan como una herramienta innovadora para resolver algunos problemas complejos de la hidráulica experimental de forma sencilla y generalmente con un bajo coste. Este estudio muestra un caso de aplicación de la técnica fotogramétrica Structure from Motion (SFM) para reconstruir la superficie de un modelo físico de drenaje urbano. De esta manera, a partir de un barrido de imágenes se ha obtenido una malla detallada de la superficie con una resolución de 5 mm y un error relativo de  $\pm 2.5\%$  respecto a técnicas topográficas convencionales para su uso en modelos numéricos 2D de transformación lluvia-escorrentía.

**Palabras clave.** Drenaje urbano, fotogrametría, modelo físico, visualización.

**Abstract.** The use of visualization techniques appears as a novel tool to solve complex experimental procedures with a simple and low-cost solution. In this research, an application of the photogrammetric technique Structure from Motion (SFM) is developed to reproduce the surface of an urban drainage full-scale facility. Thus, a detailed mesh reconstruction of the street surface was obtained from a photo scanning with a resolution of 5 mm and a relative error of  $\pm 2.5\%$  compared with conventional techniques in order to be the input topography for 2D runoff-rainfall models.

**Keywords.** Photogrammetry, physical model, urban drainage, visualization.

## 1. Introducción

En el ámbito del drenaje urbano y de los modelos de transformación lluvia-escorrentía, las elevaciones en la superficie de la cuenca estudiada cobran una especial importancia por su gran influencia en el flujo superficial debido a los bajos calados que se dan. En este aspecto, los modelos digitales del terreno son usados habitualmente como base topográfica, siendo claves en la precisión de este tipo de modelos (Casas et al., 2006).

Esta sensibilidad a la topografía de la cuenca se acentúa en el caso de los modelos físicos de laboratorio y en cuencas pequeñas, que cuentan con un área mucho menor y en donde las mallas que se utilizan en su modelización numérica tienen elementos del orden de centímetros o milímetros. Es por ello que, en estos casos, es necesario un levantamiento topográfico en el que se determinen con precisión las dimensiones y elevaciones del modelo físico, con el coste de tiempo y recursos que ello conlleva.

Debido a esta circunstancia, las técnicas de visualización se presentan como una posible alternativa de bajo coste al levantamiento topográfico. En los últimos años estas técnicas se están empezando a emplear en el ámbito de la ingeniería hidráulica, siendo un ejemplo el estudio presentado por Detert et al. (2016) donde se utiliza la

técnica Structure from Motion (SFM) en el levantamiento de un cauce fluvial o, a una escala mucho más reducida, Regueiro-Picallo et al. (2017) analizan la acumulación de sedimentos en conducciones de saneamiento con la misma técnica de visualización.

En este artículo se plantea la utilización de la técnica fotogramétrica SFM para la obtención de las elevaciones y de la geometría de la superficie de un modelo físico de laboratorio. Esto permitirá disponer de una malla detallada para modelizar con precisión las principales variables hidráulicas que se dan en la superficie del modelo.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Modelo físico

El estudio se ha llevado a cabo en un modelo físico de escorrentía urbana situado en las instalaciones del laboratorio de hidráulica del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidade da Coruña. El modelo consiste en un simulador de lluvia situado sobre un tramo de calle de  $6 \times 6 \text{ m}^2$  a escala real, dividido en una parte de acera y un pavimento de hormigón. La escorrentía generada por la lluvia en la superficie drena a través de dos arquetas hacia una red de



tuberías. En Naves et al. (2017) se puede encontrar una descripción más detallada del modelo.

## 2.2. Técnica Structure from Motion

La técnica SFM se basa en principios estereoscópicos que permiten reconstruir un objeto 3D a partir de la superposición de fotografías. Se diferencia de las técnicas fotogramétricas convencionales en que la geometría de la escena, las posiciones de la cámara y sus orientaciones se resuelven a través de cálculos computacionales (Tomás et al., 2016).

En este estudio se ha utilizado el software de licencia gratuita VisualSFM (Wu et al., 2011; Wu 2013) para la reconstrucción digital de la superficie del modelo experimental. Para ello, se han realizado 50 fotografías desde diferentes posiciones sobre la calle y planos generales a 2.50 m de altura, utilizando una cámara Lumix GH4 con una distancia focal de 28 mm y una resolución de imagen de 3264x2448 píxeles. Estas imágenes se han realizado buscando cierta superposición (60% aprox.), de manera que el software fuese capaz de obtener mediante triangulación las coordenadas del mayor número de puntos posibles. En el caso del modelo estudiado, el color del pavimento de hormigón es muy homogéneo, lo que dificulta la identificación de puntos comunes por el software. Debido a esto, se recurrió a proyectar una imagen sobre la superficie de la calle para conseguir la textura necesaria que permitiese la obtención de una nube de puntos lo suficientemente densa y, a su vez, una iluminación constante (Figura 1a).

## 2.3. Tratamiento de la nube de puntos

Una vez obtenida la nube de puntos de la superficie mediante el software VisualSFM, ésta se escala y se referencia mediante al menos cuatro puntos con coordenadas conocidas situados sobre la calle. Para ello, se ha utilizado el software de uso libre MeshLab, con el que también se ha texturizado el modelo 3D resultante a partir de las fotografías (Figura 1b).

Una vez hecho esto, se ha decidido transformar la nube de puntos bruta (967,000 elementos) en una malla con elementos espaciados 5 mm entre sí, a la cual se ha aplicado una mediana bidimensional a cada cota de tamaño 50x50 elementos. Realizando estas

operaciones se eliminan cotas erróneas de la nube de puntos bruta y se reduce considerablemente el número de puntos, manteniendo una resolución aceptable y favoreciendo los tiempos de cálculo con la malla resultante.

## 3. Resultados y discusión

En la Figura 2a se incluye el mapa de elevaciones de la superficie del modelo, obtenido a partir de la nube de puntos de la reconstrucción mostrada anteriormente en la Figura 1b. Finalmente, para el escalado y posicionamiento de los puntos se han utilizado cinco puntos de referencia sobre la superficie obteniéndose un error en el ajuste del 0.5%.

Esta topografía resultante se ha comparado además con un mapa de elevaciones obtenido a partir de las distancias de una malla rectangular de 144 puntos, separados 50 cm entre sí, a un plano láser horizontal de referencia (Figura 2b). Para poder comparar ambas topografías se han interpolado las alturas medidas a partir del plano láser con la misma resolución (5 mm) del mapa de elevaciones obtenido con la técnica SFM. En la Figura 2c se presentan las diferencias relativas entre ambas topografías, obteniendo valores máximos en torno al 2.5%. En esta comparación se puede ver como la técnica fotogramétrica es capaz de obtener unos resultados de precisión similar al método de medir las distancias a un plano de referencia.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se ha obtenido una topografía detallada de la superficie de un modelo físico de drenaje urbano a partir de un barrido de imágenes del mismo. En la comparación de los resultados con mapas de elevaciones obtenidos mediante la interpolación de medidas puntuales, se concluye que la técnica presentada es capaz de mantener la precisión de las medidas pero con una resolución diez veces mayor y con un coste económico y de tiempo muy reducido. Con esta mayor resolución es posible medir variaciones en la superficie del modelo debidas a imperfecciones constructivas o desgaste, que pueden llegar a formar canales preferenciales de flujo.

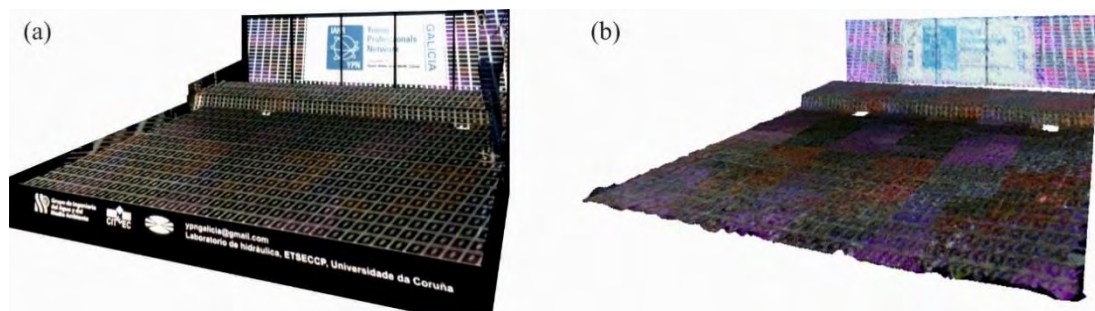


Figura 1. (a) Imagen proyectada sobre la superficie del modelo físico. (b) Reconstrucción 3D a partir de la nube de puntos obtenida mediante la técnica fotogramétrica SFM.

Ante los resultados obtenidos en este trabajo, la técnica fotogramétrica SFM se presenta como una herramienta de bajo coste muy adecuada para la obtención de la topografía base para modelos numéricos 2D de transformación lluvia-escorrentía, como por ejemplo Iber (Bladé et al., 2014). En estos modelos los bajos calados desarrollados hacen que la precisión al medir las elevaciones sea fundamental.

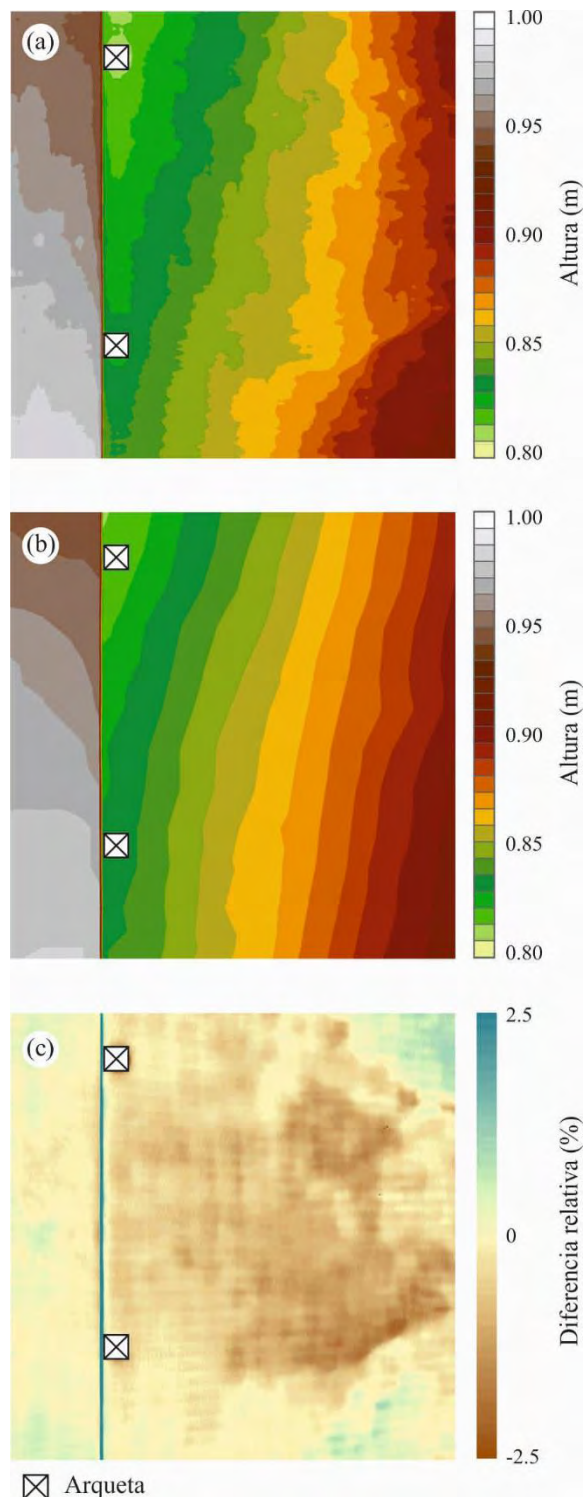


Figura 2. (a) Mapa de elevaciones obtenido a partir de la técnica fotogramétrica SFM; (b) mapa de elevaciones mediante medidas puntuales respecto a un plano láser; (c) diferencia relativa entre las anteriores topografías.

## Agradecimientos

El trabajo del autor Juan Naves ha sido financiado por la beca de doctorado FPU14/01778.

## Referencias

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M. E., Dolz, J., Coll, A. (2014). "Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*; 30(1): 1-10.
- Casas, A., Benito, G., Thorndycraft, V. R., Rico, M. (2006). "The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling". *Earth Surface Processes and Landforms*; 31(4): 444-456.
- Detert, M., Huber, F., Weitbrecht, V. (2016). "Unmanned aerial vehicle-based surface PIV experiments at Surb Creek". *Proceedings of the River Flow 2016*, Julio 12-15, St. Louis, MO, USA, pp. 563-568.
- Naves, J., Jikia, Z., Anta, J., Puertas, J., Suárez, J., Regueiro-Picallo, M. (2017). "Experimental study of pollutant washoff on a full-scale street section physical model". *Water Science and Technology*; 76(10): 2821-2829.
- Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Suárez, J., Puertas, J., Jácome, J. (2017). "Aplicación de la técnica Structure From Motion (SfM) para la determinación de la acumulación de sedimentos en redes de saneamiento". *V Jornadas de Ingeniería del Agua*, Octubre 25-26, A Coruña, España, pp. 202-203.
- Tomás, R., Miguel Cano, A. R., Abellán, A., Jordá, L. (2016). "Structure from Motion (SfM): una técnica fotogramétrica de bajo coste para la caracterización y monitoreo de macizos rocosos". *Símpoio sobre reconocimiento, tratamiento y mejora del terreno*, Octubre 19-21, A Coruña, España, pp. 209-215.
- Wu, C., Agarwal, S., Curless, B., Seitz, S.M. (2011). "Multicore bundle adjustment". *Proceedings of the Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Junio 20-25, Colorado Springs, CO, USA, pp. 3057-3064.
- Wu, C. (2013). "Towards Linear-time Incremental Structure From Motion". *Proceedings of the 2013 International Conference on 3D Vision-3DV 2013*, Junio 29 – Julio 1, Seattle, WA, USA, pp. 127-134.



# Cuantificación de la retención de nitrato usando un modelo hidrodinámico en el humedal Abras de Mantequilla, Ecuador

## *Quantification of the nutrient regulation functions using a hydrodynamic model in the Abras de Mantequilla wetland, Ecuador*

(Recepción 30/01/2018; Aceptación 12/03/2018)

Minaya V.<sup>1\*</sup>, Batdelger O.<sup>2</sup>, van Griensven A.<sup>1,2</sup>, Dastgheib A.<sup>2</sup>, Arias-Hidalgo M.<sup>3</sup>, Alvarez-Mieles G.<sup>2</sup>, Mynett A.E.<sup>2</sup>, Spiteri C.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Vrije Universiteit Brussel, Pleinlaan 2, 1050 Brussel, Belgium

<sup>2</sup> UNESCO-IHE Institute for Water Education, P.O. Box 3015, 2601 DA Delft, The Netherlands

<sup>3</sup> Escuela Politécnica del Litoral, Campus Gustavo Galindo Velasco, Guayaquil, Ecuador

<sup>4</sup> Deltares, Rotterdamseweg 185, P.O. Box 177, 2600 MH, Delft, The Netherlands

\*Email: verominaya81@hotmail.com

**Resumen.** Los humedales permiten procesos fundamentales como la transformación dinámica de materia y energía, y éstos tienen funciones importantes de regulación a nivel de cuenca para la retención de nitrógeno y control de inundaciones. Este estudio se enfoca en la aplicación de un modelo hidrológico en conjunto con uno de calidad de agua para lograr una descripción integral cualitativa y cuantitativa de las condiciones ecológicas en el humedal Abras de Mantequilla. La simulación del modelo reveló que el 86% del nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) que entra al humedal es transportado aguas abajo y el 14% es denitrificado.

**Palabras clave.** balance de nutrientes; Calidad de agua; modelo DELFT3D-WAQ; procesos de remoción de nutrientes.

**Abstract.** Wetlands enable fundamental processes such as the transformation dynamics of matter and energy. They may have important regulating functions at the river basin scale, by nitrogen retention or flood mitigation. A hydrodynamic and water quality model were used to simulate quantify the nutrient retention and define the dominating nutrient removal processes in the Abras de Mantequilla wetland. Simulation results showed that 86% of nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) is transported downstream and 14% is denitrified.

**Keywords.** DELWAQ modeling; nutrient balance; nutrients removal processes; Water quality.

## 1. Introducción

Los humedales son ecosistemas que permanecen saturados de agua la mayor parte del año y son considerados como una zona de transición ecológica con especies acuáticas, semi acuáticas y terrestres (May, 2006). Los procesos en el humedal resultan de las interacciones hidrológicas, geomorfológicas, suelo y vegetación y comprende transformaciones de materia y energía a nivel de ecosistema, dando lugar al desarrollo, auto mantenimiento y provisión de bienes y servicios para el ecosistema (Turner y otros, 2000). Un indicativo de la capacidad de recuperación del humedal es la conservación de la biodiversidad en conjunto con los servicios del ecosistema como la remoción de nutrientes (Barbier, 1994). Sin embargo, los humedales pueden degradarse seriamente cuando la carga de nutrientes excede los valores críticos (Verhoeven y otros, 2006). Los humedales y la vegetación actúan como zonas de amortiguamiento ya que filtran los contaminantes de la cuenca antes de que estos sean llevados aguas abajo (Hattermann y otros, 2006), y donde el nitrógeno puede ser retenido en tres procesos diferentes, absorción de la planta, sedimentación y denitrificación. En la mayoría de los ecosistemas acuáticos lenticos, la denitrificación ha sido hallada como el mecanismo primario (Jensen y otros, 1990).

Además de la evaluación de la calidad de agua, se hace necesario incorporar el discernimiento de como la hidrodinámica está relacionada con los procesos químicos, físicos y biológicos así como con las transformaciones que ocurren dentro del humedal. Específicamente, se analiza cómo el ciclo de nutrientes cambia durante la época lluviosa y cuáles son los niveles de amoníaco y oxígeno disuelto al final del periodo. Es crítico conocer las condiciones de los niveles de nutrientes en el humedal a fin de mitigar los efectos respecto a los servicios del ecosistema como la diversidad biológica, retención de nutrientes y calidad de agua. El humedal es uno de los casos de estudio del proyecto WETwin, que busca realzar el rol de los humedales a nivel de cuenca para mejorar las funciones de los servicios a la comunidad en equilibrio con una buena conservación del estado ecológico del mismo (Johnston y otros, 2013).

## 2. Metodología

### 2.1. Descripción del sitio

El humedal Abras de Mantequilla (AdM) está localizado a 106 km al noreste de Guayaquil dentro de la cuenca del Río Quevedo-Vinces, el tercer mayor contribuyente de la cuenca del Río Guayas, con una descarga anual promedio de  $800 \text{ m}^3/\text{s}$  durante la época lluviosa en marzo mientras que su flujo menor es de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  registrado durante la época seca



en noviembre (Arriaga, 1989). Durante la época lluviosa, el agua fluye desde el Estero Boquerón hacia el humedal, y durante la transición a la época seca el agua fluye desde el humedal y descarga en el Río Nuevo a través del anterior (Fig. 1).



Figura 1. Humedal Abras de Mantequilla y su confluencia con el Estero Boquerón.

## 2.2. Configuración del modelo

El sistema del modelo contiene dos componentes el DELFT3D-FLOW y DELFT3D-WAQ. El primero tiene un dominio que cubre el humedal AdM y el Estero Boquerón con una resolución espacial de 45m x 75m sumando un total de 19566 de celdas ortogonales curvilíneas. El intervalo de tiempo para el cálculo fue de un minuto debido a estabilidad y criterio (número de Courant menor que 1). El módulo de flujo de agua fue usado para simular la hidrodinámica, la advección y difusión de los contaminantes a una profundidad promedio. El segundo modelo numérico tiene la misma resolución espacial y el mismo tiempo de simulación para la época lluviosa (de enero a marzo 2011) y está acoplado a características importantes como el balance de agua, los patrones de flujo y las velocidades para la simulación de la calidad de agua en el dominio a través del archivo de comunicación.

La ecuación 1 está basada en la ley de Flick donde la carga es estimada considerando un coeficiente de difusión dado  $D_{NH_4}$  (Ecuación 2) (Picioreanu y otros, 1997), la diferencia en la concentración de  $NH_4$  entre el agua y el sedimento ( $NH_{4wat}$  y  $NH_{4sed}$ , respectivamente), y la profundidad como un flujo unidireccional

$$\text{Carga} = -D_{NH_4} \left( \frac{NH_{4wat} - NH_{4sed}}{\text{Depth}} \right) g/s \quad (1)$$

$$\text{donde: } D_{NH_4} = 1.86 \times 10^{-9} m^2/s \text{ a } 30^\circ C \text{ y } pH=7 \quad (2)$$

## Balance de masa

El DELFT3D-WAQ usa como ecuación básica la de convección-difusión para el cálculo de balance de masas, Ecuación 3 y es expresado para un estado de la variable y un segmento; donde M es la variable del estado de masa (g), t es el tiempo (s), y el cambio de masa como resultado de transporte T (g/s), residuo de cargas W (g/s) y procesos P (g/s). La Ecuación 4 expresa el balance de masa para el  $NO_3^-$ .

$$\frac{dM}{dt} = T(t) + W(t) + P(t) \quad (3)$$

$$\frac{\Delta NO_3}{\Delta t} = \text{cargas} + \text{nitrificación} - \text{denitrificación} - \text{flujo de salida} \quad (4)$$

## 3. Resultados

### 3.1. Hidrodinámica (Delft3D-FLOW)

El modelo hidrodinámico fue calibrado y validado para la época lluviosa entre enero y abril del 2010. En general tanto la descarga como los niveles de agua en el Estero Boquerón y en el humedal fueron acertados ( $r^2=0.84$ ). Sin embargo, algunas de las diferencias entre los niveles de agua simulados y observados aguas abajo del Estero Boquerón podrían deberse a que los procesos de evaporación e infiltración no fueron incluidos en el modelo hidrodinámico.

### 3.2. Dinámica de nutrientes (DELFT3D-WAQ)

El modelo simuló las concentraciones de  $NO_3^-$  para ajustar a los puntos individuales de los datos del muestreo en la temporada, la mayoría de sitios corresponden con la línea de la simulación (Fig. 2a). Por el contrario, los valores de oxígeno disuelto (DO) medidos en el sitio presentan mayores divergencias con los valores simulados de DO en los diferentes sitios de muestreo (Fig. 2b). El DO es un parámetro sensible que puede experimentar fluctuaciones fuertes durante el día en respuesta a los cambios de temperatura y del nivel de agua. El  $NO_3^-$  fue calibrado por los parámetros del proceso de denitrificación y el oxígeno disuelto por otros dos parámetros, específicamente demanda de oxígeno disuelto en el sedimento (FSOD) y los coeficientes de reaeración (KLRear).

La carga de nitrato de las fuentes no puntuales pudo haber sido sobreestimada ya que los valores simulados eran más altos que los medidos (Tabla 1). Es importante notar que la carga de nutrientes calculada como datos de entrada para el modelo fue estimada considerando un coeficiente de difusión dado y una profundidad promedio (Ecuación 1).

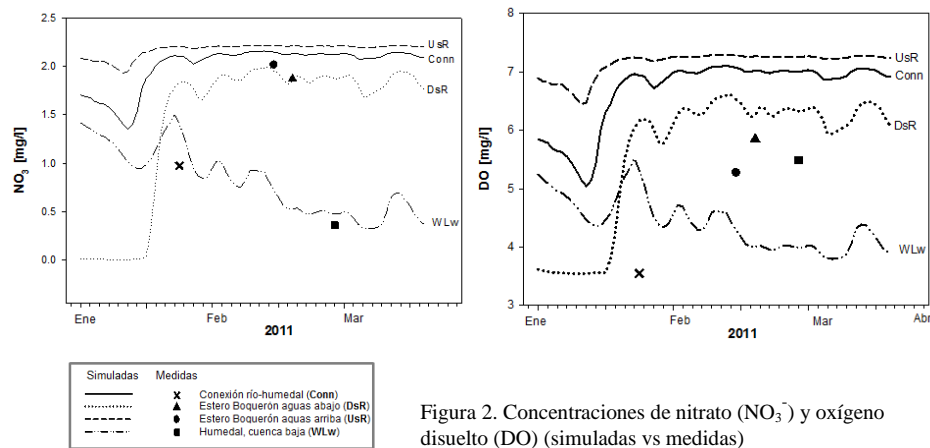

 Figura 2. Concentraciones de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y oxígeno disuelto (DO) (simuladas vs medidas)

Tabla 1: Parámetros físico-químicos del humedal y Estero Boquerón antes y después de la confluencia en la sub-cuenca del Chojampe, Ecuador para la época lluviosa (Febrero 2011)

Parámetros	Humedal		Río después de la confluencia		Río antes de la confluencia	
	pmdio $\pm$ sd	IQR	pmdio $\pm$ sd	IQR	pmdio $\pm$ sd	IQR
pH	7.05 $\pm$ 0.23	0.23 <sup>a</sup>	7.20 $\pm$ 0.25	0.18 <sup>a</sup>	7.05 $\pm$ 0.24	0.21 <sup>a</sup>
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	33.00 $\pm$ 1.15	1.10 <sup>b</sup>	27.57 $\pm$ 2.16	1.53 <sup>a</sup>	27.84 $\pm$ 1.84	1.76 <sup>a</sup>
DO (mg/l)	2.81 $\pm$ 2.33	2.12 <sup>a</sup>	5.79 $\pm$ 0.08	0.06 <sup>a</sup>	4.66 $\pm$ 0.97	0.87 <sup>a</sup>
Temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ )	28.40 $\pm$ 2.17	2.15 <sup>a</sup>	24.80 $\pm$ 0.14	0.10 <sup>a</sup>	25.97 $\pm$ 1.15	1.00 <sup>a</sup>
Turbidez (NTU)	7.36 $\pm$ 6.11	5.75 <sup>a</sup>	109.50 $\pm$ 10.61	7.50 <sup>a</sup>	103.43 $\pm$ 80.24	73.35 <sup>a</sup>
Alcalinidad (mg/l)*	47.37 $\pm$ 2.34	2.03 <sup>b</sup>	29.44 $\pm$ 0.00	0.00 <sup>a</sup>	33.16 $\pm$ 4.69	4.06 <sup>a</sup>
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/l)	0.02 $\pm$ 0.01	0.01 <sup>a</sup>	0.02 $\pm$ 0.00	0.00 <sup>a</sup>	0.01 $\pm$ 0.00	0.00 <sup>a</sup>
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/l)	0.19 $\pm$ 0.18	0.18 <sup>b</sup>	1.57 $\pm$ 0.43	0.30 <sup>a</sup>	1.37 $\pm$ 0.56	0.52 <sup>a</sup>
$\text{PO}_4$ (mg/l)	0.07 $\pm$ 0.02	0.02 <sup>b</sup>	0.02 $\pm$ 0.00	0.00 <sup>a</sup>	0.03 $\pm$ 0.01	0.01 <sup>a</sup>
TSS (mg/l)	21.00 $\pm$ 2.00	2.00 <sup>b</sup>	79.00 $\pm$ 1.41	1.00 <sup>a,b</sup>	37.67 $\pm$ 29.96	29.00 <sup>a</sup>

Nivel de significancia (código: '\*' 0.05)

Pruebas Tukey post-hoc de comparación múltiple (códigos: a,b)

Se puede manifestar que incluso si hay una influencia hidrológica del río hacia el humedal durante la época lluviosa, el humedal mantiene los niveles de concentración del  $\text{NO}_3^-$  más bajos que los valores del Estero Boquerón. Se puede observar una tendencia de la concentración del  $\text{NO}_3^-$ , donde los valores más altos se presentan aguas arriba del río y decrecen hacia aguas abajo. Los valores bajos de la concentración del DO simulados dentro del humedal resultan de la disminución del oxígeno que puede darse debido a la demanda del oxígeno en el sedimento en combinación con una baja aireación del agua.

El porcentaje del DO de saturación en la temporada de lluvia mostró niveles que van desde el orden del 70 al 80% en aguas en movimiento en la cuenca media del humedal. Luego hacia el final de la temporada, el DO (%) disminuyó entre el 60 y 70% para los pequeños riachuelos en la cuenca baja (Fig.3a). En general, los valores altos fueron observados en la confluencia debido a la mezcla y procesos de re aireación provenientes del río. Los valores bajos de DO (%) ocurrieron dentro del humedal, donde el agua se encuentra estancada y la cantidad de oxígeno está limitada por la temperatura.

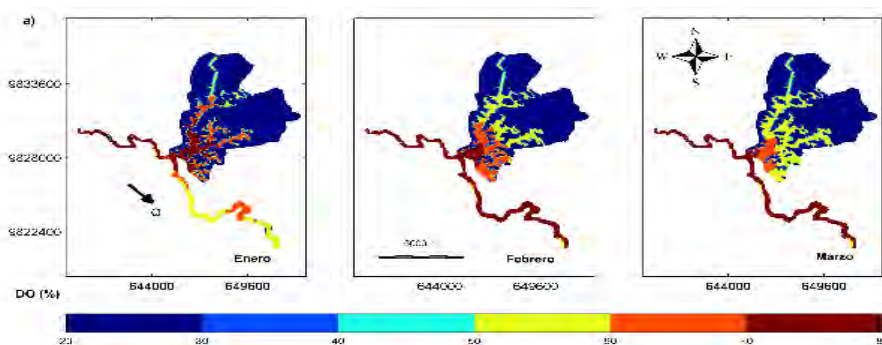


Figura 3a. DO durante la época lluviosa enero – marzo (promedio mensual) en la capa superior

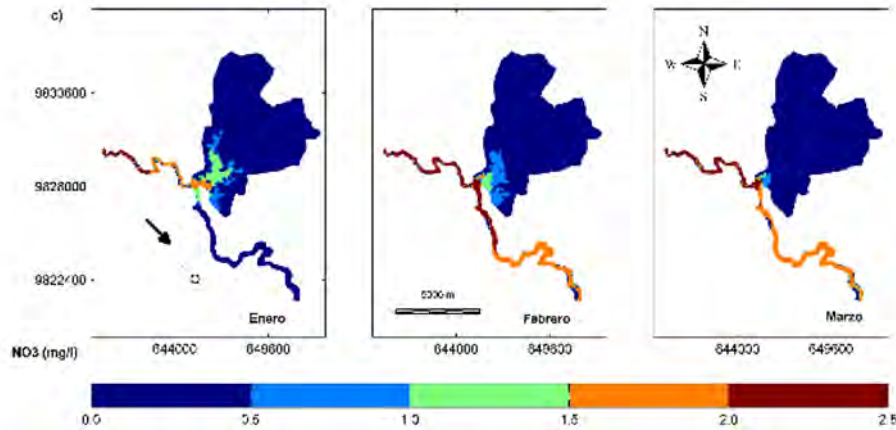


Figura 3b. DO y  $\text{NO}_3^-$  durante la época lluviosa enero – marzo (promedio mensual) en la capa superior

El  $\text{NO}_3^-$  presenta las más altas concentraciones en el río aguas arriba del humedal (Fig.3b). Se puede decir que el proceso de denitrificación es el que predomina en el humedal, donde el gas nitrógeno es liberado hacia la atmósfera. La concentración de  $\text{NO}_3^-$  disminuyó un 36% de un valor de 1.4 mg/l a 0.5 mg/l al final de la época lluviosa, principalmente debido a la denitrificación mediante procesos microbianos, siendo el único proceso en donde el nitrógeno deja el sistema por completo.

### 3.3. Balance de masa de los nutrientes

La fuente principal de nitrato calculado provino de la entrada del Estero Boquerón, el proceso de nitrificación dentro del humedal es despreciable. El nitrato en la salida del agua correspondió al 86% y la denitrificación como el único proceso de remoción del nitrato del sistema fue del 14% (Fig. 4); tendencias similares fueron demostradas por McJannet y otros (2011).

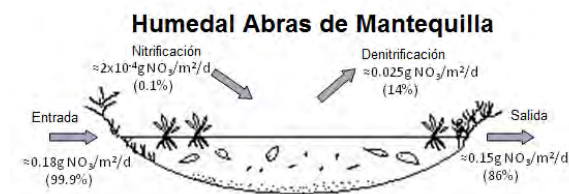


Figura 4. Balance de masa del nitrato durante de la época lluviosa (tiempo de simulación = 88 días)

## Conclusiones

A pesar de la cantidad y calidad de los datos disponibles y la complejidad del modelo, éste probó ser una buena herramienta para visualizar la variabilidad espacial y temporal de los nutrientes en el humedal. El modelo mostró como las concentraciones de nutrientes fueron transformadas o transferidas dentro del sistema. Es necesario realizar campañas de mediciones más elaboradas para evaluar con mayor certeza la dinámica espacio-temporal de

los nutrientes y así lograr un mejor entendimiento de las funciones y servicios que presta el humedal.

## Referencias

- Arriaga, L. (1989). The Daule-Peripa dam project, urban development of Guayaquil and their impact on shrimp mariculture. Narragansett, R.I., USA, Coastal Resources Center, University of Rhode Island.
- Barbier, E. (1994). "Valuing environmental functions: tropical wetlands." *Land. Econom* 70(2): 155-173.
- Hattermann, F. F., V. Krysanova, y otros (2006). "Integrating wetlands and riparian zones in river basin modelling." *Ecological Modelling* 199(4): 379-392.
- Jensen, J., Kristensen P., Jeppensen E. (1990). "Relationships between nitrogen loading and in lake concentrations in shallow lake Danish lake." *Verh. Int. Ver. Limnol.* 24: 201-4.
- Johnston, R., Cools, J., Liersch, S., Morardet, S., Murgue, C., Mahieu, M., Zsuffa, I., Uyttendaele, G.P. (2013). "WETwin: A structured approach to evaluating wetland management options in data-poor contexts". *Environmental Science and Policy*, 34: 3-17.
- May, S., Ed. (2006). "aquatic and wetland plants." *Invasive Aquatic and Wetland Plants*, Invasive Species Science Online. New York.
- McJannet, D., Wallace J., Keen R., Hawdon A., Kemei J. (2011). "The filtering capacity of a tropical riverine wetland: II. Sediment and nutrient balances." *Hydrological Processes* doi: 10.1002/hyp.8111.
- Picioreanu, C., van Loosdrecht M., Heijnen J (1997). "Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor " *Water Sci Technol* 36(1): 147-156.
- Turner, R., van der Bergh J., Soderqvist T., Barendregt A., van der Straaten J., Maltby E., van Ierland E (2000). "Ecological-Economic analysis of wetlands: scientific integration for management and policy." *Ecological Economics* 35(1): 7-23.
- Verhoeven, J. T. A., Arheimer, B., Yin, C., Hefting, M.M., (2006). "Regional and global concerns over wetlands and water quality ." *Trends in Ecol. Evol* 21(2): 96-103.



# Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas. Estudo de Caso: Sistema de Abastecimento de Água de Arouca *Operational Management of Hydraulic Infrastructures Case Study: Arouca Water Supply System*

(Recepción 31/01/2018; Aceptación 26/03/2018)

Cardoso-Gonçalves, J.<sup>1</sup>; Tentúgal-Valente, J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mestre em Engenharia Civil, Estudante Doutorado (FEUP)

<sup>2</sup> Doutor em Engenharia Civil, Professor Associado (FEUP)

Tel.: +351 918 425 218

Email: up200902986@fe.up.pt

**Resumo.** A metodologia de Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas que se apresenta no presente artigo visa apoiar a gestão dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais e integra as componentes: Desafios, Organização, Avaliação de Infraestruturas, Exploração e Intervenção. Partindo de dados de exploração destes sistemas, pretende-se reduzir os custos de exploração e incrementar a qualidade do serviço. A metodologia em desenvolvimento enquadra-se como um elemento agregador de conceitos de gestão patrimonial de infraestruturas, de gestão do risco e de gestão técnica. Utiliza-se como caso de estudo o Sistema de Abastecimento de Água de Arouca para a aplicação.

**Palavas-chave.** Gestão Operacional; Gestão Patrimonial; Gestão do Risco; Gestão Técnica; Abastecimento de Água.

**Abstract.** The methodology of Operational Management of Hydraulic Infrastructures presented in this paper aims to support the management of water supply and drainage of waste water systems and it integrates the components: Challenges; Organization; Evaluation of Infrastructures; Exploration; Intervention. Starting from systems operation data, it is intended to reduce the operating costs and to increase the quality of service. The methodology in development fits as an aggregator of the concepts of patrimonial infrastructures management, risk management and technical management. Arouca Water Supply System is used as the case study for the application.

**Keywords.** Operational Management; Patrimonial Management; Risk Management; Technical Management; Water supply

## 1. Introdução

A engenharia, em cooperação com outras áreas de conhecimento, desempenha um papel decisivo no planeamento, na conceção e na gestão das infraestruturas. A gestão sustentável da água deve constituir uma aposta assertiva das entidades envolvidas, refletida em instrumentos legais e de gestão (Cardoso-Gonçalves, 2016).

A análise crítica da gestão operacional de infraestruturas hidráulicas, com base em dados reais de exploração, refere-se como o objetivo central do presente estudo, que se organiza nos seguintes pontos: introdução, estado da arte, gestão operacional, caso de estudo e discussão.

## 2. Enquadramento

Os procedimentos a adotar na captação e distribuição de água em condições de potabilidade e, após utilização, na recolha, no transporte e na sua devolução aos meios recetores, resultam do reconhecimento da importância associada a uma correta utilização da água para consumo humano. O

ciclo urbano da água (captação, distribuição, recolha, transporte e devolução) representa uma parte do ciclo hidrológico, no qual intervém, mais acentuadamente, o Homem (Tentúgal-Valente, 2007).

### 2.1. Gestão Patrimonial

O “património em infraestruturas” caracteriza-se como um conjunto de ativos que não podem ser substituídos na sua globalidade, podendo renovar-se de forma fracionada, intervir em componentes individuais e conservar a função do sistema como um todo (Burns et al., 1999). A gestão patrimonial de infraestruturas centra-se na estruturação de práticas de gestão tradicionais, integrando-as nos princípios de gestão focados em objetivos e com vista à melhoria contínua, e valorizando-as com novas técnicas de análise, de comparação e de comunicação entre partes interessadas (Alegre et al., 2012). Pode definir-se como arte de equilibrar o desempenho, o custo e o risco, apoiando-se em competências de gestão, engenharia e informação, devendo planear-se ao nível tático, estratégico e operacional. A definição de prioridades e a seleção de necessidades de



intervenção necessitam do conhecimento dos ativos (localização, estado de conservação). O diagnóstico da situação existente possibilita que se efetue uma avaliação da vida residual e do valor económico das infraestruturas (Alegre, 2008).

## 2.2. Gestão do Risco

A gestão de infraestruturas hidráulicas depara-se com riscos associados à segurança de pessoas e bens, à salvaguarda do ambiente e à tomada de decisão. O conceito de risco não apresenta uma definição rigorosa, simples e unânime. Relativamente a aplicações técnicas da análise quantitativa dos riscos, realça-se como consolidada a definição geral do risco, que apresenta, como ponto de partida, a hipotética ocorrência, no futuro e em determinado sistema, de um acontecimento com consequências negativas ou positivas. Nesta abordagem, o risco (R) é quantificado através do produto entre a probabilidade de ocorrência (P) e a consequência (C), de acordo com a equação (1) (Almeida, 2011).

$$R (\text{€}) = P \times C(\text{€}) \quad (1)$$

Da perspetiva operacional, a utilização de metodologias de cálculo do risco simplificadas (produto de probabilidades por consequências), mais flexíveis, e sustentadas em históricos de dados reais, pode revelar-se vantajosa em detrimento de modelos mais sofisticados, com incertezas associadas às variáveis consideradas pelos próprios modelos (Cardoso-Gonçalves, 2016).

## 2.3. Gestão Técnica

A gestão técnica de infraestruturas hidráulicas relaciona-se com diferentes desafios associados à gestão operacional, nomeadamente a gestão da mudança em entidades gestoras, o controlo operacional e o contexto atual da crescente urbanização de zonas com infraestruturas construídas.

Salienta-se a necessidade do conhecimento das infraestruturas, das condições de operação e de exploração e do pessoal operador (Rodrigo et al., 2007).

## 3. Gestão Operacional

O desenvolvimento de um modelo comum de gestão, aplicável em diferentes cenários, refere-se como um dos objetivos da investigação em curso. As infraestruturas de abastecimento de água, de drenagem e tratamento de águas residuais e de drenagem de águas pluviais podem investigar-se do ponto de vista da operacionalidade, do risco e da decisão (Cardoso-Gonçalves, 2016).

A metodologia em desenvolvimento baseia-se nos conceitos de gestão introduzidos (gestão patrimonial; gestão do risco; gestão técnica) e nos principais desafios da gestão dos sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais (visão integrada; sustentabilidade; inovação) (Cardoso-Gonçalves, 2016). O suporte à tomada de decisão e a definição de estratégias operacionais identificam-se como pontos cruciais da metodologia abordada. A estrutura de gestão operacional representa-se esquematicamente na figura 1.

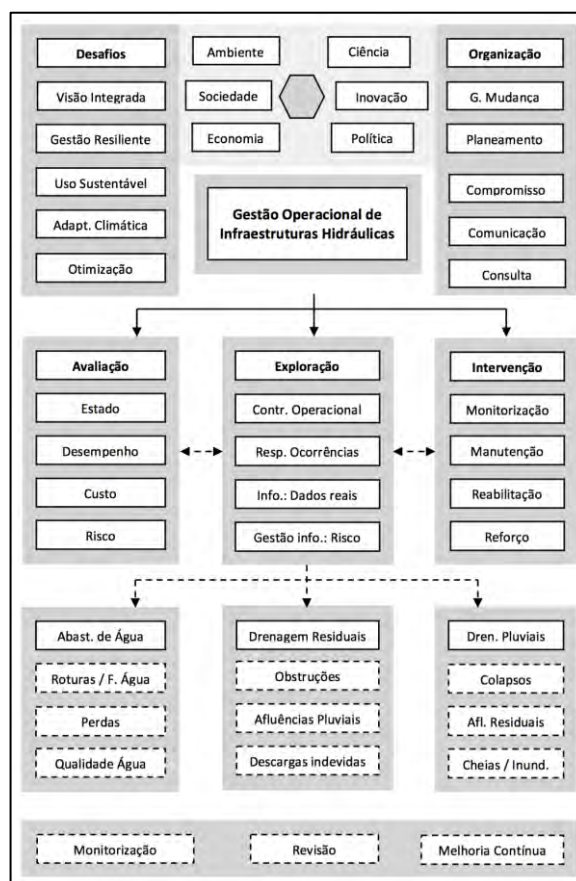


Figura 1. Representação Esquemática da Metodologia de Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas

## 4. Caso de Estudo

De forma a dar cumprimento aos objetivos estabelecidos, utilizou-se, como caso de estudo, o Sistema de Abastecimento de Água de Arouca (SAA-Arouca). O SAA-Arouca apresenta duas origens principais: Abastecimento em alta pela Águas do Douro e Paiva (AdDP); Origens autónomas. A figura 2 representa o SAA-Arouca e indica algumas informações infraestruturais fornecidas pela Entidade Gestora (Águas do Norte, S.A. – AdN).

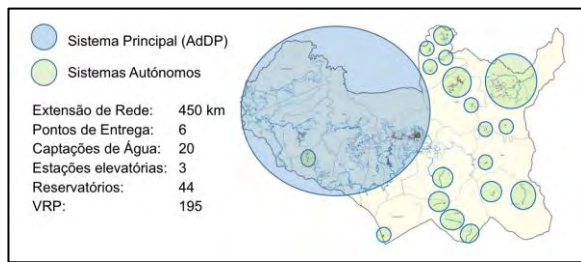


Figura 2. Sistema de Abastecimento de Água de Arouca

#### 4.1. Dados de Exploração

Numa análise mais alargada do SAA-Arouca, do ponto de vista da Gestão Operacional, pretende-se analisar os dados reais relativos a roturas, faltas de água, não conformidades de qualidade de água e consumos. Nesta análise, apresentam-se os dados do número mensal de roturas (figura 3).

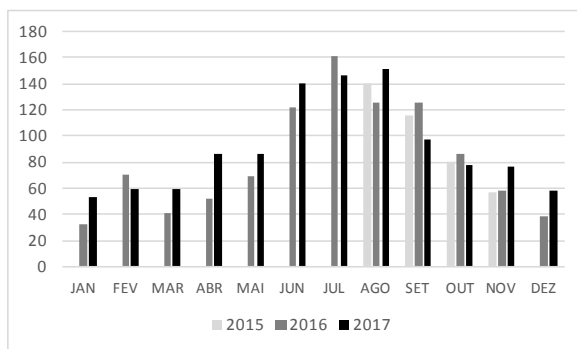


Figura 3. Número de roturas mensal no SAA-Arouca

No que se refere à ocorrência de roturas, evidencia-se uma incidência mais acentuada nos meses de junho, julho, agosto e setembro.

#### 4.2. Gestão Informada pelo Risco

Apresenta-se uma breve descrição do estudo do Risco de Rotura do SAA-Arouca, que se encontra em desenvolvimento. Considerou-se o registo facultado pela entidade gestora, a partir do qual se determinou o custo médio de rotura, considerando os custos associados a prestador externo, pessoal interno (AdN) e encargos com pavimentações. Determinou-se um custo médio de rotura de 337€.

Tendo em conta a equação (1), determinou-se o Risco de Rotura em cada Subsistema do Sistema Principal, que se apresenta no gráfico da figura 4.

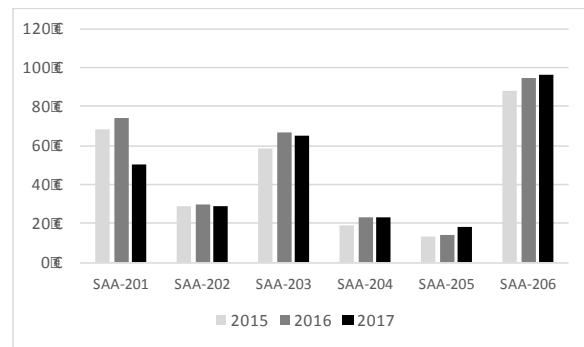


Figura 4. Risco de Rotura por Subsistema (SAA-Arouca)

### 5. Discussão

As linhas orientadoras da metodologia de gestão operacional em desenvolvimento encontram-se definidas, de acordo com a estrutura definida na figura 1, que integra conceitos de gestão abordados no estado da arte, particularmente: gestão patrimonial (estado, desempenho, custos, risco, manutenção e reabilitação); gestão do risco (metodologias de cálculo simplificadas, com base em dados reais, introdução do conceito de gestão operacional informada pelo risco); gestão técnica (conceitos operacionais e organizacionais).

A aplicação da metodologia, designadamente na avaliação das infraestruturas (determinação do risco de rotura por subsistema), permite o estabelecimento de estratégias de exploração (controlo operacional e resposta a ocorrências – roturas) e de intervenção (monitorização de pressões na rede; substituição de troços com elevada incidência de roturas). No SAA-Arouca, o reforço da capacidade de resposta a ocorrências nos meses de junho a setembro e a necessidade de investimento no combate a roturas nos subsistemas SAA-201, SAA-203 e SAA-206 identificam-se como estratégias operacionais a adotar.

De acordo com a estratégia definida em Cardoso-Gonçalves (2016), identificam-se diversas áreas a explorar, designadamente: desafios do setor da água; enquadramento organizacional; avaliação de infraestruturas; estratégias de exploração; intervenções a executar.

A estrutura de Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas em desenvolvimento pretende responder aos principais desafios da gestão da água, propondo estratégias operacionais que visem a sustentabilidade económica, a proteção do ambiente e a salvaguarda de pessoas e bens.

## Referências

A Almeida, A.B. (2011). “Gestão da Água: Incertezas e Riscos. Conceptualização Operacional.” Esfera do Caos, Lisboa.

Alegre, H. (2008). “Gestão Patrimonial de Infra-estruturas de Abastecimento de Água e de Drenagem e Tratamento de Águas Residuais.” Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.

Alegre, H., Coelho, S.T., Leitão, J.P. (2012). “Gestão Patrimonial de Infra-estruturas em Sistemas Urbanos de Água.” Jornadas LNEC, Cidades e Desenvolvimento, 18 a 20 de Junho de 2012, Lisboa.

Burns, P., Hope, D., Roorda, J. (1999). “Managing infrastructure for the next generation.” Automation in Construction.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. (2014). “Tipificação e Caracterização de Consumos em Reservatórios de Distribuição. Influência na Exploração e Capacidade.” Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Cardoso-Gonçalves, J.J.T. (2016). “Gestão Operacional de Infraestruturas Hidráulicas.” Projeto de Tese de Investigação, Programa Doutoral em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Rodrigo, C., Lopes, J.L., Saúde, M., Mendes, R., Casimiro, R. (2007). “Controlo operacional em sistemas públicos de abastecimento de água.”. IRAR, Série Guias Técnicos, N.º10.

Tentúgal-Valente, J.C. (2007). “Disciplina de Hidráulica Urbana e Ambiental. Apontamentos.” Textos pedagógicos desenvolvidos no âmbito da unidade curricular de Hidráulica Urbana e Ambiental, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.



# Simulación LES de flujos turbulentos: el clásico ejemplo del flujo alrededor de un cilindro

## *Large Eddy Simulations of turbulent flows: the classic case of a flow over a cylinder*

(Recepción 31/01/2018; Aceptación 09/04/2018)

Ramos, P.X.<sup>1</sup>; Bento, A.M.<sup>2,3</sup> e Pêgo, J.P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ghent University, Hydraulics Laboratory Sint-Pietersnieuwstraat 41, 9000 Ghent, Belgium.

<sup>2</sup>Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, R. Roberto Frias, 4200 Porto, Portugal.

<sup>3</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.

Teléfono: +320489963637

Email: pedro.ramos@ugent.be

**Resumen.** Durante las últimas 4 décadas, el crecimiento en la potencia computacional permitió el progreso en el modelo Large Eddy Simulations (LES) para flujos turbulentos. En este artículo, estudiamos el flujo turbulento alrededor de un cilindro, en dos etapas de erosión distintas. Tenemos en cuenta los fundamentos conceptuales de LES y los principios utilizados en su aplicación. Se utilizan datos experimentales para la validación de los resultados de este caso clásico de estudios de CFD (acrónimo del inglés *Computational Fluid Dynamics*).

**Palabras clave.** Large Eddy Simulation, turbulencia, Computational Fluid Dynamics

**Abstract.** During the last 4 decades, the growth in computational power enabled the substantial progress in the development of Large Eddy Simulations (LES) for turbulent flows. In this paper, we develop two independent simulations of the flow around a cylinder. We take into account the conceptual foundations of LES, the principles used in its application and, additionally, experimental data is used for the validation of the results in THIS classic case of CFD (Computational Fluid Dynamics) studies.

**Keywords.** Large Eddy Simulation, turbulence, Computational Fluid Dynamics.

## 1. Introducción

La aplicación de técnicas numéricas al estudio de los flujos, que habitualmente se conocen como técnicas CFD (acrónimo del inglés *Computational Fluid Dynamics*), aporta una descripción del flujo en estudio, permitiendo visualizar y comprender el patrón de flujo que aparece en ríos, canales y aplicaciones industriales. El flujo alrededor de un cilindro circular es un fenómeno muy complicado y ha sido objeto de interés de muchos estudios en mecánica de fluidos, tanto numéricos como experimentales. El presente artículo ha sido concebido con el objetivo de reunir las principales etapas de una simulación numérica del flujo alrededor de un cilindro usando el modelo Large Eddy Simulation (LES). En este documento se describe las directrices para buscar y discriminar información relevante para implementar herramientas CFD en y obtener resultados válidos para lo estudio del flujo y erosión alrededor de un pilar cilíndrico.

## 2. Metodología computacional

La herramienta elegida, *Ansys Fluent*, utiliza el método de volúmenes finitos para resolver las ecuaciones LES correspondientes (Rodi et al. 2013). En este caso, las simulaciones se llevan a cabo en dos etapas. En primer lugar, se efectúa una simulación para obtener una solución fluidodinámica del flujo

con un fondo plano (configuración A). Luego, a través de una deformación del fondo, se puede simular el mismo flujo con una cavidad de erosión alrededor del mismo cilindro (configuración B). Con millones de celdas en cada una de las simulaciones, el empleo de estas herramientas es inviable si no se dispone de capacidad de cálculo en paralelo mediante *clusters* de ordenadores. En el presente trabajo fue utilizado el HPC *supercomputer* de la Ghent University.

## 3. Malla y condiciones de contorno

El dominio de interés (Fig. 1,  $D$  es el diámetro del cilindro) puede ser dividido en pequeños elementos (en este caso, 3 millones de celdas) cuya unión y continuidad forman una malla.

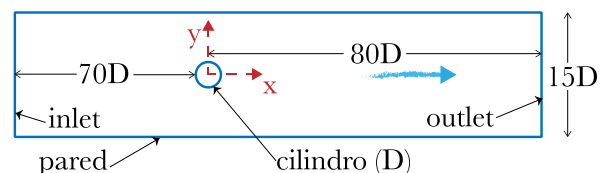


Figure 1. Dominio numérico (vista en planta).

Schindfessel et al. 2015 explican cómo crear una malla (Fig. 2) válida para la simulación de flujos turbulentos.

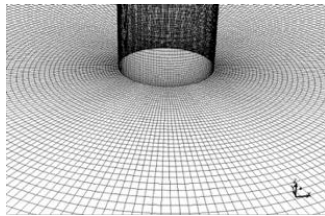


Figure 2. Malla (zona cercana do cilindro).

En las paredes, la condición de *no-slip* (es decir, velocidad nula) es empleada. Se ha usado una frontera rígida como la superficie del flujo de canal “abierto”. Esa simplificación es válida para situaciones en que  $\Delta h$ , Fig. 3 y Ecuación 1, no tiene un efecto apreciable (Rodi et al. 2013; Ramos et al. 2016), que se ocasiona por el bajo número de *Froude* ( $\Delta h/h < 10\%$ ).

$$\frac{\Delta h}{h} \approx \frac{Fr^2}{2} \quad (1)$$

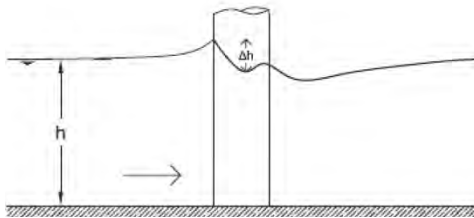


Figure 3. Deformación de la superficie (Ramos et al. 2016).

El *inlet* se define con una velocidad constante ( $V=0.286$  m/s, Nogueira et al. 2008). El *outlet* se define como *outflow*, fijando el valor de FRW (acrónimo del inglés *Flow Rate Weighting*) como 1. Con esto, se define que la totalidad del fluido debe salir por esta cara.

## 4. Validaciones y resultados

### 4.1 Verificaciones

Como condiciones iniciales se toma flujo potencial. La vorticidad es cero en todo el dominio. Por lo tanto, tenemos que descartar los primeros instantes de la simulación (Fig. 4, Schindfessel et al. 2015).

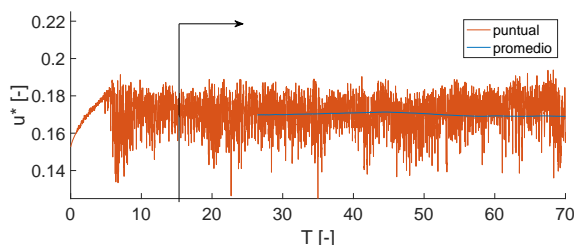


Figure 4. Velocidad en una celda.

Pope (2004) indica que una simulación LES debe tener, por menos, 80% de energía cinética turbulenta (TKE) solucionada en la malla (Fig. 5) y designa algunas directrices para su correcta verificación.

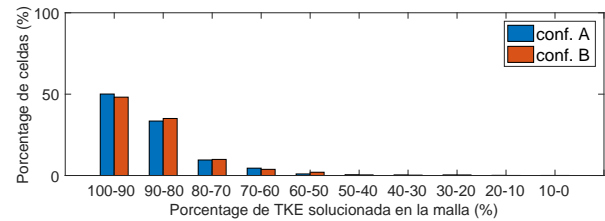


Figura 5. Porcentaje de TKE solucionada.

### 4.2 Validaciones

En este estudio, se han calculado dos de los parámetros más característicos del flujo: frecuencia de desprendimiento ( $f$ ) y coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) (Tabla 1). Estas simulaciones, sin embargo, son costosas en términos de tiempo de CPU y también de tiempo real. Para reducir estos costos, se ha aplicado un sub-modelo para las zonas cercanas de las paredes del flujo. Por lo tanto, ahí es más sensible al error (Fig. 6). Los valores de velocidad están adimensionales (por la velocidad media del flujo,  $V=0.286$  m/s).

Tabla 1. Parámetros más característicos del flujo alrededor de un cilindro: configuración A vs. configuración B (Ramos et al. 2016).

	Numérico	Experimental	Teórico
$f$ [Hz]	1.10 / 1.09	1.15	1.19
$C_d$ [-]	0.602 / 0.455	-	0.683

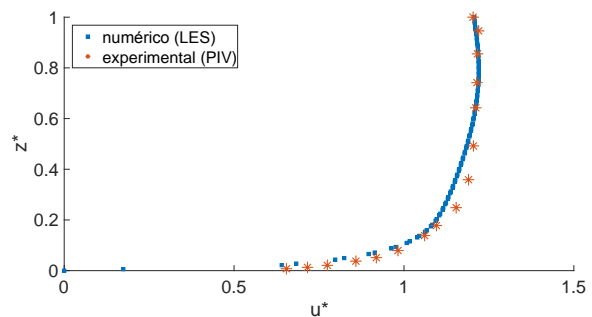


Figura 6. Perfil de velocidad (experimental - Nogueira et al. 2008).

### 4.3 Otros resultados

En el plano  $z^*=0.5$  (Fig. 7) se muestra la velocidad del flujo ( $z^*=z/h$ ).

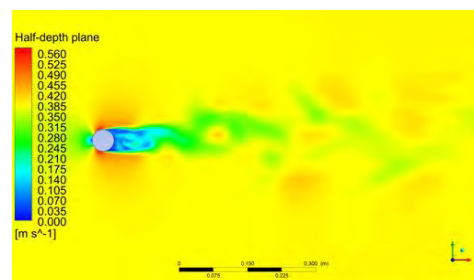


Figura 7. Velocidad (magnitud) del flujo.

Finalmente, en la imagen se observa el esfuerzo de corte del fondo del canal “abierto” en la

configuración A, simplemente para comparar si es que existe un mayor esfuerzo de corte en el fondo plano o en la configuración B.

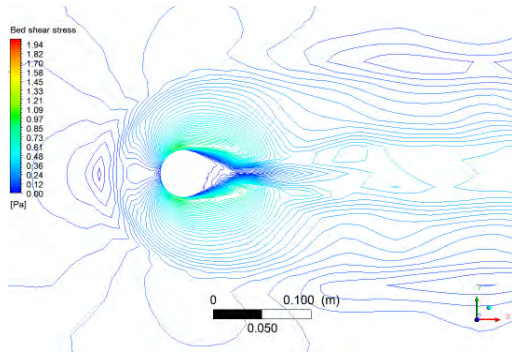


Figura 8. Esfuerzo de corte (*configuración A*).

## 5. Conclusiones

En este artículo, se ha demostrado que el método Large-Eddy Simulation puede aplicarse a los problemas de turbulencia y permite predecir y estudiar situaciones donde el flujo presenta un comportamiento particularmente complicado.

Basado en los resultados obtenidos y el posterior análisis a partir de ellos, se puede concluir que para el caso estudiado, la cavidad de erosión altera significativamente el coeficiente de arrastre y la frecuencia de desprendimiento de los vórtices.

El siguiente paso será añadir un modelo para el transporte de sedimentos y calcular el desarrollo de los lechos móviles con LES.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Laurent Schindfessel (*UGent*) por sus esfuerzos al explicar cómo ha hecho sus simulaciones. A los autores les gustaría agradecer también al *HPC-UGent* y a Lía Cernega.

## Referencias

Nogueira, H., Franca, M., Adduce, C. and Ferreira, R. (2008). Bridge piers in mobile beds: visualization and characterization of the surrounding and approaching flows. Proc. River Flow 2008, Turkey, 2397-2406.

Pope, S. B. (2004). Ten questions concerning the large-eddy simulation of turbulent flow. New J. Phys., 6.

Ramos, P. X.; Maia, R.; Schindfessel, L.; De Mulder, T.; & Pêgo, J. P., (2016). "Large Eddy Simulation of the water flow around a cylindrical pier mounted in a flat and fixed bed" IJREWHS. Lubeck, Alemania.

Rodi, W., Constantinescu, G., & Stoesser, T. (2013). Large-eddy simulation in hydraulics. CRC Press.

Schindfessel, L., Creëlle, S., & De Mulder, T. (2015). Flow patterns in an open channel confluence with increasingly dominant tributary inflow. Water, 7(9), 4724-4751.

# Diagnóstico y control de inundaciones en el río Villeta

## *Flood risk assessment and control in the Villeta River*

(Recepción 10/01/2018; Aceptación 09/05/2018)

Sanabria Morera A. C.<sup>1</sup>; Sandoval-Pabón R. L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Estudiante Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia. Miembro de la IAHR Bogotá Young Professional Network  
Teléfono: +57 1 3165000 ext 13412  
Email: rlsandovalp@unal.edu.co

**Resumen.** Se estudió la probabilidad de inundación en el cauce principal del río Villeta (Colombia) ante fenómenos de precipitación sobre la cuenca del río Villeta. Se realizó el estudio hidrológico a través de la herramienta HEC-HMS para eventos de precipitación con diferentes periodos de retorno. Se empleó el software, HEC-RAS para realizar la modelación hidráulica 1D y HEC-geoRAS para la creación de los mapas de amenaza. Se encontró que, ante eventos de amenaza alta, media y baja se producen inundaciones que afectan la zona urbana y rural del municipio, por lo que se propusieron medidas para disminuir el riesgo.

**Palabras clave.** Hidráulica de ríos; hidrología; inundación.

**Abstract.** Floods probability in the Villeta River (Colombia) caused by precipitation was studied. An hydrological model was performed using the HEC-HMS tool for different return periods. The HEC-RAS software was used to perform 1D simulation of the floods and HEC-geoRAS to create the floods maps. It was found that in the face of high, medium and low precipitation, floods that affect the rural and urban zone of the watershed occur. For this reason, structural and non-structural actions to diminish the risk were proposed.

**Keywords.** River hydraulics, hydrology, floods.

## 1. Introducción

En Colombia, el 28% de los habitantes viven en zonas con riesgo alto de inundaciones, dichas inundaciones son causadas por deforestación o tala de bosques, quemas y otras prácticas de cultivo que erosionan el suelo, obras públicas mal diseñadas, invasión y/o taponamiento de cauces, urbanización en rondas hidráulicas de los ríos (espacio requerido por un río), entre otras (IDEAM, 2017).

La Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR en su Plan de Acción para la Atención de la Emergencia y Mitigación de sus Efectos establece que con frecuencia se han presentado inundaciones en Soacha, Puerto Salgar, Ricaurte, Girardot, Chía, Cota, Mosquera, Fontibón, Tocancipa, Utica, Apulo, Sesquilé, La Calera, Nimaima, La Vega, Villeta y en el suroccidente de Bogotá. En consecuencia ha priorizado el análisis de inundaciones sobre dichas zonas (CAR, 2011).

El objetivo del presente estudio es el diagnóstico de las inundaciones en la cuenca del río Villeta hasta su desembocadura en el río Negro, causadas por eventos de precipitación extrema. La simulación se realizó para fenómenos con alta, media y baja probabilidad. Ante las inundaciones simuladas se propusieron medidas para mitigar los costos asociados a las inundaciones.

### 1.1. Descripción del área de estudio

La cuenca del río Villeta se encuentra localizada en el departamento de Cundinamarca (Colombia), tiene influencia territorial en 11 municipios entre los que se encuentra el municipio de Villeta cuyo centro urbano es atravesado por cauce principal del río Villeta justo antes de su desembocadura al río Negro. El área de la cuenca es de aproximadamente 480 km<sup>2</sup> y posee 7 subcuencas. La longitud del cauce principal es de aproximadamente 41.5 km, sus elevaciones varían entre 696 y 3017 m.s.n.m. con una pendiente media de 18.6 grados.

La cuenca del río Villeta pertenece a la Zona hidrográfica del río Negro y esta pertenece a la macrocuenca del Magdalena-Cauca. La cobertura de la cuenca es principalmente de pastos, cultivos y espacios naturales con cerca del 70% del área.

### 1.2. Caracterización hidrológica

La delimitación de la cuenca del río Villeta hasta su desembocadura en el río Negro fue realizada a partir de la información de un DEM generado por el satélite ALOS PALSAR, el DEM fue procesado a través del módulo de hidrología de las herramientas de análisis espacial del software ArcGIS.

Se delimitaron 7 subcuencas empleando HEC-geoHMS. Con la información recopilada se identificaron 3 polígonos de Thiessen (Thiessen & Alter, 1911). Con esto se puede asignar a cada





subcuenca su propia precipitación para un periodo de retorno dado. De manera alterna se emplearon metodologías de interpolación como IDW, sin embargo, el cambio en la relación de las áreas de influencia de cada estación no es significativo.

De las series de precipitaciones se observa que los periodos de menores valores se extienden durante los meses de junio a agosto, y los meses de diciembre y enero, mientras que las épocas de mayores valores ocurren durante los meses de marzo y mayo y los meses de octubre y noviembre.

Se construyeron curvas IDF con ayuda del método de curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad – duración – y frecuencia (Díaz-Granados, 1998).

Se determinó el tiempo de concentración mediante múltiples metodologías como las de Williams, Temez, U.S. Corps of Engineers y Passini. Pese a que existen múltiples metodologías para la estimación del tiempo de concentración, la aplicabilidad de cada una de estas depende de las condiciones geográficas de la zona de estudio. Para la cuenca del río Villeta se identificó que era posible aplicar varias metodologías. Sin embargo, para evitar el sesgo que puede generar el seleccionar una metodología específica se decidió emplear el promedio de dichas metodologías. El tiempo promedio adoptado para el tiempo de concentración fue 140 minutos.

Mediante el método del bloque alterno se construyó para cada una de las 3 estaciones los hietogramas de precipitación con una duración de 140 minutos con incrementos cada 10 min, para cada uno de los periodos de retorno objeto del estudio (2.33, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años).

En la parte baja de la cuenca del río Villeta se cuenta con la estación limnimétrica Villeta con código 23067070 la cual posee registros diarios de caudal medio desde el año de 1977 hasta el 2015. Los valores máximos registrados en dicha estación se compararon con los caudales obtenidos de la implementación del modelo con el fin de calibrar el modelo hidrológico.

El área de la cuenca capturada hasta la estación limnimétrica es de aproximadamente el 80% del área total de la cuenca.

### 1.3. Caracterización hidráulica

La topología de la red corresponde a un patrón dendrítico equivalente a un conjunto de corrientes que semejan las ramificaciones de un árbol frondoso. Con la identificación del cauce principal del río Villeta y apoyándose en las herramientas de análisis 3D del Sistema de información Geográfico ArcGIS, Se generó el perfil longitudinal del cauce a partir de la interpolación de la elevación del cauce con el DEM. Pese a que la representación de la topografía podría ser mejor, el objetivo del trabajo es emplear únicamente información secundaria.

## 2. Construcción del modelo

### 2.1. Modelo hidrológico

Para el proceso de modelación se utilizó la herramienta hidrológica HEC-HMS. Para la estimación de las pérdidas fue empleado el método del número de curva (USDA, 1972), en dicho modelo se calibro el coeficiente de pérdidas iniciales arrojando resultados entre 0.2 y 0.3. El número de curva fue estimado y calibrado a partir de las tablas propuestas por el SCS y con ayuda de los mapas de cobertura y suelos de Cundinamarca (IGAC, 2000). Como método de transformación lluvia-escorrentía, fue empleado el método del hidrograma unitario del SCS, como único parámetro se asumió que el tiempo de retardo era equivalente al 60% del tiempo de concentración estimado (USDA, 1972). Finalmente, el modelo de transito de crecientes seleccionado fue el de la curva cinemática el cual como parámetros requiere información hidráulica como la longitud del canal, el ancho del canal, la pendiente y el coeficiente de rugosidad de Manning. Dicho parámetro tuvo un valor inicial de 0.05 y fue estimado mediante la ley de Lane y Carlson. La calibración de los parámetros se realizó manualmente dado que no existe registro de información subdiaria que permita calibrar automáticamente el modelo de eventos. No existe información disponible que permita la validación del modelo.

### 2.2. Modelo hidráulico

Para el estudio hidráulico de inundaciones en la corriente principal del río Villeta se utilizó el software HEC-RAS. La modelación consistió en la simulación en flujo permanente de los caudales picos obtenidos del modelo hidrológico para cada uno de los periodos de retorno (Se emplearon los caudales pico pues es la situación más desfavorable). La geometría del modelo hidráulico fue obtenida mayoritariamente del DEM ALOS PALSAR con resolución de 12.5 metros. Para ello se utilizó la herramienta arcGEO-RAS, se generaron secciones cada 50 a 200 metros. Adicionalmente, para los tramos en los que se contaba con topografía de detalle se realizó la corrección de las secciones transversales a fin de tener mayor precisión.

## 3. Resultados

Como resultado del modelo hidrológico se obtuvieron los caudales pico para cada tramo y periodo de retorno los cuales se pueden consultar en la tabla 1.

Como resultado del modelo hidráulico se obtuvo para cada periodo de retorno un mapa de las zonas inundadas, en la figura 1a se presenta el mapa del casco urbano de Villeta ante una inundación de amenaza alta (T=10 años).

Tabla 1. Caudales pico (m<sup>3</sup>/s) ante diferentes periodos de retorno

Tramo del río	Periodo de Retorno (años)						
	2.33	5	10	25	50	100	500
1	11	20	31.7	53.6	76.2	105.2	203.8
2	30.3	50.5	75.9	122.2	169	228.2	425.6
3	43.2	74.1	113.4	185.5	259.1	352.2	665.9
4	136.7	247.5	383.8	620.8	858.7	1154.9	1744.7
5	174.5	271.6	425.6	692.6	959.1	1293	1996.3

#### 4. Análisis de resultados

Se evidenciaron cortes en los polígonos de inundación los cuales se deben esencialmente a la discontinuidad que producen las grandes separaciones entre las secciones transversales en la modelación hidráulica.

Se realizó un análisis de costos de inundación asignando un valor a cada tipo de cobertura y ponderando de acuerdo al mapa de cobertura el cual arrojó como resultado que más del 95% del costo de inundación se debe a la inundación de la zona urbana. Por lo anterior se decidió proponer medidas no estructurales para disminuir los costos de inundación en la zona rural y medidas estructurales para disminuir dicho costo en el área urbana.

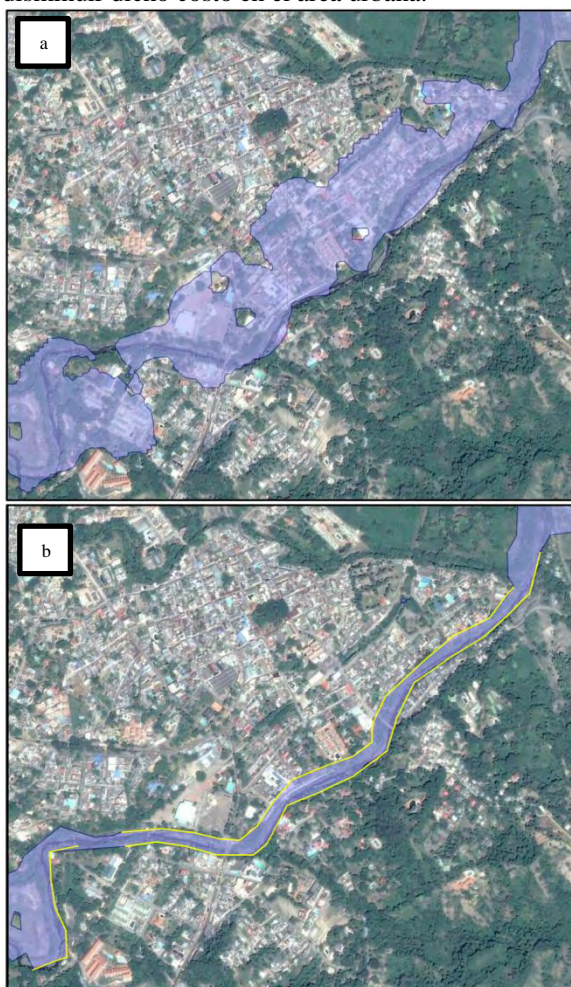


Figura 1. Comparación entre el área de inundación antes y después de la aplicación de las medidas propuestas en la zona urbana de la cuenca. La línea amarilla corresponde a los diques longitudinales propuestos.

Las medidas no estructurales consistieron en la formulación de planes de ordenamiento territoriales que reconozcan la ronda de inundación del río para así no solo evitar la construcción en zonas potencialmente inundables sino además para disminuir en lo máximo posible el escurrimiento con reforestación en la parte alta y media de la cuenca.

Las medidas estructurales consisten en la protección de la vegetación marginal del cauce para que esta establezca el trazado en planta del río y a la vez disminuya el momentum lineal del fluido. Adicionalmente, se propone la construcción de un dique longitudinal en ambos márgenes del río. Dicho dique debe tener al menos 2.5 metros de altura, medidos desde el lecho del río y debe ser sometido a un análisis de factibilidad.

Cada una de las medidas propuestas debe ir acompañada de campañas de capacitación y sensibilización que permitan a los habitantes de la zona, conocer y prepararse para hacer frente al riesgo disminuyendo la vulnerabilidad y encaminándose hacia un aprovechamiento sostenible de los servicios ecosistémicos que la cuenca provee.

Se modificaron parámetros del modelo (Número de curva, abstracciones iniciales, tiempo de concentración y coeficiente de Manning) y se modificó la superficie topográfica para incluir diques longitudinales. Se encontró que las medidas propuestas sirven para disminuir de manera considerable el costo de inundación en el municipio de Villeta. En la figura 1b se puede apreciar la disminución en el área de inundación del río.

#### 5. Conclusiones y recomendaciones

La cuenca del río Villeta (Colombia) es altamente vulnerable a fenómenos de inundación causados por eventos de precipitación extrema, especialmente en su área urbana la cual puede representar más del 95% de los costos de un evento de inundación. Con ayuda del ejercicio realizado se demostró que es suficiente el uso de información secundaria para la elaboración de estudios de diagnóstico y control de inundación en las cuencas hidrográficas de Colombia, sin embargo, dicho estudio no tendrá la precisión de un estudio realizado con información primaria, razón por la cual debe ser tenido en cuenta solo bajo condiciones en las que la información secundaria sea de buena calidad. Se sugiere continuar el ejercicio planteado realizando análisis de costo beneficio para estimar la viabilidad de cada una de las medidas propuestas.

#### 6. Referencias

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (2011). Plan de Acción para la Atención de la Emergencia y la Mitigación de sus Efectos – PAAEME. Bogotá D.C.

Díaz-Granados, M. (1998). “Curvas sintéticas regionalizadas de Intensidad - Duración - Frecuencia para Colombia” Revista de Ingeniería Uniandes 1998; 1:1-13.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2017). Mapas de Amenaza por Inundación.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2000). Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del Departamento de Cundinamarca. Bogota D.C.

Thiessen, A.J. & Alter, J.C. (1911). “Precipitation average for large areas.” Monthly Weather Review 1911; 39: 1082-1084.

United States Department of Agriculture – USDA (1972). National Engineering Handbook. Washington D. C.



# Caracterización de curvas de gasto en desagües profundos de presas mediante modelado CFD

## *Characterization of rating curves in dam bottom outlets using CFD modeling*

(Recepción 31/01/2018; Aceptación 09/05/2018)

Bayón, A.<sup>1</sup>; Macián-Pérez, J.F.<sup>1</sup>; Río, F.<sup>2</sup>, Conesa, F. J.<sup>2</sup>, & García-lorenzana, D.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ing. del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (España).

<sup>2</sup>Endesa Generación S.A.

Teléfono: (+34) 96 3877613

Email: arbabar@iiama.upv.es

**Resumen.** El flujo en desagües profundos de presas constituye un fenómeno complejo debido a sus grandes dimensiones, así como a las dramáticas consecuencias de un eventual fallo. Se presenta una metodología numérica para caracterizar las curvas de gasto de este tipo de estructuras según la posición de sus elementos de regulación. Para ello, se desarrolla un modelo CFD empleando un modelo de turbulencia RANS  $k-\epsilon$  RNG y un método VOF para tratar la presencia de aire. Los resultados muestran coherencia con la física del fenómeno, aunque no se ha llevado a cabo todavía una validación basada en observaciones de campo.

**Palabras clave.** CFD;  $k$ -epsilon; presa; RNG; VOF.

**Abstract.** The flow in dam bottom outlets constitutes a complex phenomenon due to its extraordinary dimensions and singularities, as well as to the dramatic consequences of an eventual failure. A numerical methodology is presented to characterize the rating curves of this kind of structures according to the position of their regulation devices. To this end, a CFD model is developed using a RANS  $k-\epsilon$  RNG turbulence model and a VOF method to deal with the expectable presence of air. The results are physically coherent with the phenomenon, although a validation based on field observation has not been conducted yet.

**Keywords.** CFD; dam;  $k$ -epsilon; RNG; VOF.

## 1. Introducción

El estudio del comportamiento hidráulico del flujo aireado en desagües profundos de presas mediante modelado numérico tridimensional se ha llevado a cabo con anterioridad (Dargahi, 2011; Harrison et al., 2014; Shamsaei y Soleymanzadeh, 2006), aunque el número de trabajos en el área disponibles en la bibliografía técnica es relativamente escaso.

De los existentes, la mayoría emplean modelos CFD con cierre de turbulencia RANS  $k-\epsilon$  basados en el método VOF implementados en códigos comerciales. No se tiene constancia de trabajos con códigos de libre acceso, salvo el presentado por este equipo en Bayón et al. (2017a) analizando los esfuerzos hidrodinámicos sobre los elementos de regulación (válvula y compuerta) de un desagüe de fondo.

En este contexto y dada la necesidad de predecir el correcto comportamiento hidráulico de estructuras tan críticas, cuyo fallo puede resultar catastrófico, se presenta una metodología basada en un modelo numérico cuyas principales diferencias con respecto a los trabajos previos son: a) se emplea software CFD de código abierto (OpenFOAM) y b) se emplea un enfoque RANS donde, en lugar de observar los estados transitorios entre diferentes escenarios, se somete a análisis una casuística muy extensa, pudiendo interpolarse las situaciones intermedias.

## 2. Materiales y métodos

### 2.1. Caso de estudio

El caso de estudio empleado es el desagüe de fondo de la Presa de Mequinenza, construida en la década de 1960 en Aragón (España). El escenario de operación considerado corresponde a un nivel de Embalse de Mequinenza de 80 m.s.n.m. y de 67 m.s.n.m del Embalse de Ribarroja, al que vierte el desagüe. Al ser la cota del desagüe de 60 m.s.n.m., la salida de este se halla sumergida.

El desagüe, de sección circular de diámetro variable entre 2 y 3 m y de 56 m de longitud, es regulado mediante una compuerta vertical y una válvula de mariposa, que cuentan con sendos conductos de aireación (1 y 2 respectivamente) aguas abajo de éstas para la rotura de carga cuando las bajas presiones dadas lo requieran (ver Fig. 1).

Seis posiciones de la compuerta (aperturas del 10, 20, 40, 60, 80 y 100%) y cinco de válvula (la apertura del 10% supone una sección de paso despreciable) son analizadas y sus resultados, empleados para ajustar las curvas de gasto del desagüe, i.e. caudal de agua vertido en función de la posición de la válvula y la compuerta. Adicionalmente, las curvas de demanda





de aire en función de éstas variables son presentadas y analizadas.

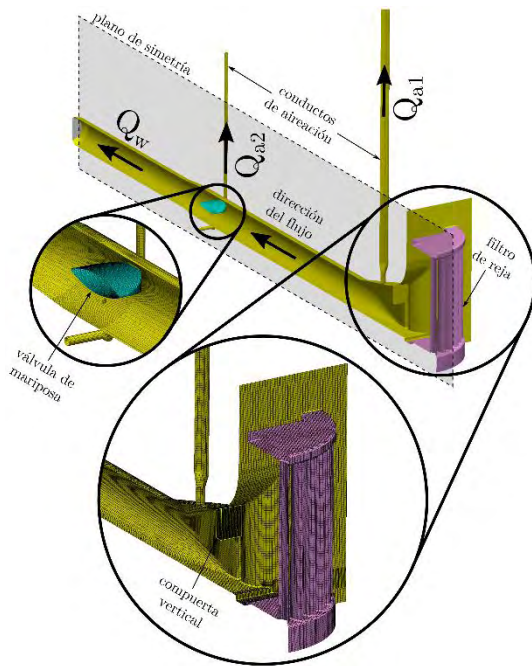


Figura 1. Sección de la geometría del desagüe con apertura de compuerta del 60% y de válvula del 100% (Bayón et al., 2017).

## 2.2. Modelo numérico

La discretización de la geometría del dominio analizado se lleva a cabo mediante una malla estructurada de elementos cúbicos con un refinamiento de relación 1/16 en las inmediaciones de las singularidades geométricas, donde son esperables mayores gradientes.

Tras llevar a cabo el correspondiente análisis de convergencia de malla según la metodología expuesta en Celik et al. (2008), se opta por una malla de  $2.75 \cdot 10^6$  elementos (tamaño mínimo de 0.0234 m).

El modelo numérico se basa la aproximación de las Ecuaciones de Navier-Stokes con promediado RANS y cierre de turbulencia RNG k- $\epsilon$ , cuyos resultados en aplicaciones similares han dado buenos resultados (Bayón et al., 2016, 2017a; 2017b; Bombardelli et al., 2011; Dargahi, 2011). El algoritmo de resolución empleado es el PIMPLE, que combina las ventajas de los algoritmos PISO y SIMPLE, según su implementación en el solver interFoam de OpenFOAM (2011).

Al contemplarse la rotura de carga del flujo en el desagüe en ciertos escenarios de operación, un modelo con un solo fluido resulta insuficiente, por lo que se considera un segundo fluido mediante el método VOF, resolviendo ambas fases, aire y agua, como un sólo fluido bifásico donde la presencia de un fluido u otro viene dada por la variable de transporte advectivo fracción de fluido. A fin de mitigar los efectos de la difusividad numérica, se emplea un algoritmo de velocidad de compresión (OpenFOAM, 2011), obteniéndose así una interfaz aire-agua nítida. En el modelo numérico planteado, se dan tres tipos de condiciones de contorno, a saber:

- Hidrostática: se aplica un perfil de presiones hidrostático a la entrada y salida del desagüe correspondiente a la columna de agua que descansa sobre cada uno de ellos.
- Atmosférica: se impone a las entradas de ambos conductos de aireación presión nula, permitiendo la salida de fluido y, en caso de presiones negativas, la entrada de aire.
- No deslizamiento: a los contornos sólidos, se les impone una condición de contorno de no deslizamiento con función de pared de alto número de Reynolds para evitar el excesivo refinamiento de la malla.

## 3. Análisis de resultados

### 3.1. Caudal de descarga

La Fig. 2 muestra el caudal de agua en función de la apertura de compuerta para diferentes aperturas de válvula, observándose que, no sólo los valores entran dentro del rango contemplado por el diseño de la infraestructura, sino que, además, muestran un patrón claro cuya tendencia es físicamente consistente.

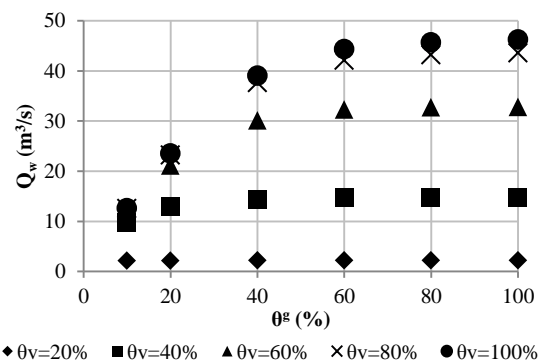


Figura 2. Caudal de agua (\$Q\_w\$) en función de la apertura de válvula (\$\theta\_v\$) y compuerta (\$\theta\_g\$).

Mediante el ajuste estadístico de dichos resultados, se obtiene que la curva de gasto, que relaciona el caudal líquido vertido \$Q\_w\$ (m³/s) con el grado de apertura de la compuerta \$\theta\_g\$ (%) y la válvula \$\theta\_v\$ (%), puede aproximarse por la Ecuación 1, con un coeficiente de determinación de \$R^2 = 0.973\$ (error medio absoluto inferior a 2 m³/s):

$$Q_w = a + b\theta_v + c\theta_v^2 + d\theta_g + e\theta_g^2 + f\theta_v\theta_g + g\theta_v^2\theta_g^2 \quad (1)$$

Los valores de las constantes de \$a\$ a \$g\$ pueden encontrarse en la Tabla 1. Otros ajustes probados, que incluían términos polinómicos de orden superior, logarítmicos, exponenciales y potenciales, arrojaban ajustes ligeramente superiores, pero la mejora del coeficiente de determinación no superaba en ningún caso el 1%, por lo que, en virtud del Principio de Parsimonia y en aras de mantener la solución matemáticamente más sencilla de entre las múltiples evaluadas, se opta por la expresión de la Ecuación 1.

Tabla 1. Resultados del ajuste estadístico de  $Q_w$ .

$a$	-6.00127	$e$	$-1.73563 \cdot 10^{-3}$
$b$	0.392273	$f$	$1.14538 \cdot 10^{-2}$
$c$	$-2.79298 \cdot 10^{-3}$	$g$	$-4.9508 \cdot 10^{-7}$
$d$	$-7.72619 \cdot 10^{-2}$		

Pese a que todavía no se dispone de datos de campo para la validación del modelo, esta expresión aporta una idea aproximada de cuál debe ser la posición de los elementos de regulación del desagüe para verter el caudal deseado durante su operación.

### 3.2. Demanda de aire

Adicionalmente, la Fig. 3 muestra la demanda de aire de ambos conductos de aireación, aguas abajo de la compuerta (1) y de la válvula (2).

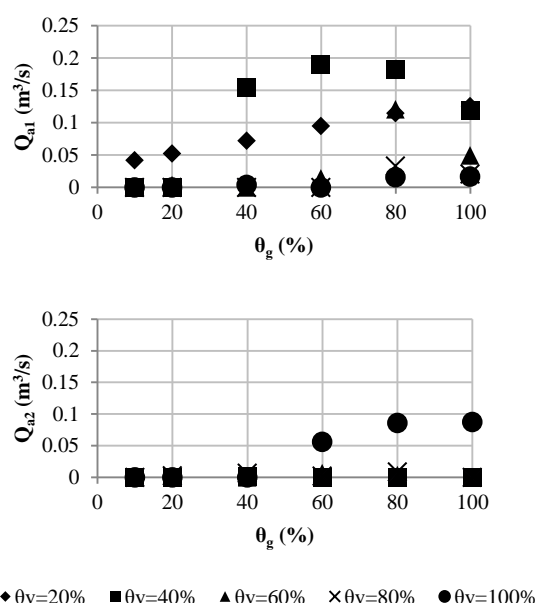


Figura 3. Caudal de aire en los conductos 1 y 2 ( $Q_{a1}$  — arriba y  $Q_{a2}$  — abajo, respectivamente) en función de la apertura de válvula ( $\theta_v$ ) y compuerta ( $\theta_g$ ).

La caracterización del caudal de aire en los conductos de aireación de presas es de gran importancia, pues documentos como la Guía Técnica de Seguridad de Presas del SPANCOLD establecen umbrales máximos, tanto de velocidad, como de pérdidas de carga a lo largo de su recorrido.

No obstante, a diferencia del caso de los caudales líquidos, las curvas de demanda de aire, que correlacionan el caudal de éste en los conductos de aireación 1 y 2 ( $Q_{a1}$  y  $Q_{a2}$ , respectivamente) con el grado de la compuerta ( $\theta_g$ ) y la válvula ( $\theta_v$ ), no parecen ajustarse a una ecuación global.

### 4. Conclusiones

El presente estudio desarrolla un modelo CFD tridimensional implementado en software de código abierto (OpenFOAM) para caracterizar las curvas de gasto de desagües profundos de presas. El ajuste de

caudales vertidos muestra un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0.973$ ), pese a que los resultados no han sido validados con observaciones de campo, tarea que constituye el trabajo futuro de esta investigación.

El mismo modelo numérico aporta datos relativos a la demanda de aire en los conductos de aireación del desagüe, pese a que estos no se ajustan a una única tendencia.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Análisis fluidodinámico del desagüe de fondo de la Presa de Mequinenza”, fruto de la colaboración entre la Universitat Politècnica de València y Endesa Generación S.A.

### Referencias

- Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J., López-Jiménez, P.A. (2016). “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump”. *Environmental Modelling Software*. 80, 322–335.
- Bayón, A., Macián-Pérez, J. F., Río, F., Conesa, F. J., y García-lorenzana, D. (2017a). “Modelado CFD del flujo aire-agua en un desagüe de fondo de presa”, *V Jornadas de Ingeniería del Agua, A Coruña*.
- Bayón, A., Toro, J.P., Bombardelli, F.A., Matos, J. y López-Jiménez, P.A. (2017b). “Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways”, *Journal of Hydro-environment Research* (in press).
- Bombardelli, F.A., Meireles, I., Matos, J. (2011). “Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways”. *Environmental Fluid Mechanics*. 11, 263–288.
- Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. & Raad, P. E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 1–4.
- Dargahi, B. (2010). “Flow characteristics of bottom outlets with moving gates”. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 476–482.
- Harrison, S., Nielsen, K., Morse, D., y Chambers, J. (2013). “Computational Fluid Dynamics Modeling of the Pueblo Dam River Outlet Works”. *Pipelines 2013: Pipelines and Trenchless Construction and Renewals—A Global Perspective*, pp. 430–439.
- OpenFOAM (2011). OpenFOAM User Guide. The Free Software Foundation Inc.
- Shamsaei, A., y Soleymanzadeh, R. (2006). “Numerical simulation of air-water flow in bottom outlet”. *International Journal of Civil Engineering*, 4(1), 14–33.

# Análisis de las características de la precipitación estimada mediante reanálisis en la Macrocuena Magdalena-Cauca (McMC), Colombia

## *Analysis of precipitation features estimated by reanalysis datasets in the Magdalena Cauca Macrobasin, Colombia*

(Recepción 29/01/2018; Aceptación 09/05/2018)

Duque-Gardeazábal N.<sup>1,2</sup>; Zamora D.<sup>1</sup>; Vega-Viviescas C.<sup>1</sup>; Arboleda P.<sup>1</sup>; Rodríguez E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH)

Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, Colombia

<sup>2</sup>Miembro de la IAHR Bogotá Young Professional Network

Teléfono: +57 1 3165000 ext 13406

Email: nduqueg@unal.edu.co

**Resumen.** Los datos de reanálisis meteorológicos pueden llegar a ser muy útiles en la gestión del recurso hídrico. Sin embargo, el desempeño de estos datos debe evaluarse comparándolos no solo con las series observadas, sino también estimando índices que caractericen ciertos componentes de las series de tiempo. En el presente trabajo se han evaluado dos conjuntos de precipitación provenientes de reanálisis (WFDEI y MSWEP) contra una interpolación realizada a partir de datos diarios de precipitación de estaciones en la McMC. Los resultados indican que el producto MSWEP tiene en general una mejor representación que el WFDEI.

**Palabras clave.** CLIMDEX; earth2Observe; evaluación; Reanálisis

**Abstract.** Meteorological reanalysis data can be useful in water resources management projects. However, the performance of these datasets must be evaluated not only by comparing them with observed data, but also by evaluating different features through time series indexes. In this article we evaluate two precipitation products coming from reanalysis (WFDEI and MSWEP) against a raingauge interpolation in the McMC. The results show that the MSWEP dataset is more reliable than the WFDEI dataset, the biggest errors of both datasets are located in the high altitudes areas of the watershed and they tend to overestimate more than underestimate.

**Keywords.** CLIMDEX; earth2Observe; evaluation; Reanalysis

## 1. Introducción

La precipitación (P) es una de las variables hidrometeorológicas del ciclo hidrológico que mayor influencia tiene sobre la disponibilidad de agua superficial en una cuenca hidrográfica. Además, es quizás una de las variables más difíciles de estimar debido a su gran variabilidad, tanto espacial como temporal (Chow, Maidment, y Mays 1988). A nivel global existen grandes regiones en donde la cantidad de estaciones es escasa y en algunos casos la longitud de las series es corta; ejemplo de ello son las regiones de la Orinoquía y la Amazonía colombianas. Por tanto, en estas regiones se dificulta realizar análisis hidrometeorológicos, fundamentales en la gestión del recurso hídrico y en análisis de variabilidad y cambio climático.

En estos escenarios de escasez de información de P, el empleo de datos globales es una excelente alternativa. El uso de datos provenientes de observaciones terrestres (EO) y de reanálisis meteorológicos en proyectos de ingeniería de recursos hídricos ha venido en ascenso en los últimos años. Estos datos se caracterizan por tener un dominio espacial grande, buenas resoluciones de muestreo (0.5° y 0.25°) y con datos continuos en

largos periodos de tiempo. A este respecto, el proyecto earth2Observe (E2O) ([www.earth2observe.eu](http://www.earth2observe.eu)), un esfuerzo de investigación internacional, está desarrollando un repositorio global de información hidrometeorológica en el que se puede acceder a diferentes conjuntos de datos y variables.

La evaluación del desempeño de productos de P globales ha sido efectuada por varios autores. Por ejemplo Beck, Vergopolan, et al. (2017) realizaron una evaluación incluyendo varios datos de reanálisis y de EO, en donde además de comparar los datos contra los registros en estaciones puntuales, compararon su desempeño a través de modelaciones hidrológicas. No obstante, las evaluaciones realizadas se han enfocado de manera general en comparar directamente las series de tiempo estimadas por los datos globales contra los registros de las estaciones o interpolaciones de las mismas. Son pocos los estudios que hacen comparaciones de características específicas de la P, como las establecidas a través del cálculo de índices (Dinku et al. 2010).

En el presente trabajo se han evaluado dos conjuntos de P (WFDEI y MSWEP) contra una interpolación a partir de datos de estaciones en la McMC. La evaluación fue realizada por medio del cálculo de algunos de los índices propuestos por el Expert Team



on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI), usados por el proyecto CLIMDEX, para enfocarse en ciertas características de las series de tiempo.

## 2. Área de estudio y datos de P

La McMC es la más importante cuenca en Colombia con un área aproximada de 257,000 km<sup>2</sup>. Dentro de ella se asienta aproximadamente el 80% de la población, se produce el 75% de la energía hidroeléctrica y el 85% del PIB; además, varios fenómenos hidroclimatológicos tienen un importante impacto sobre ella, siendo el más importante El Niño Southern Oscillation (ENSO) (Poveda, Waylen, y Pulwarty 2006).

### 2.1. Datos *in situ* Interpolados

Se creó un campo a partir de los datos de las estaciones pluviométricas ubicadas en la McMC, con menos de 15% de datos faltantes, proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM). Se realizó una interpolación a una resolución de 0.1° (aprox. 10 km) a nivel diario de los registros de las estaciones presentes en la cuenca para el período 1980-2012. Esto se efectuó con el método de Kriging con Deriva Externa (KDE).

### 2.2. Datos de reanálisis

La principal fuente de información usada en el proyecto E2O es el reanálisis meteorológico ERA-Interim. Este fue usado para generar los conjuntos de datos *WATCH Forcing Data methodology applied to ERA-Interim (WFDEI)* (Weedon et al. 2014) y el *Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation (MSWEP)* (Beck, van Dijk, et al. 2017). Estos datos fueron reescalados a la resolución de 0.1°.

## 3. Índices para identificar cambios en valores extremos

Para estudiar cambios en eventos extremos, el ETCCDI planteó una serie de índices climáticos (Zhang et al. 2011). Estos analizan año a año (y en algunos casos mes a mes), las variables P y temperatura, basados principalmente en el análisis de las colas de las distribuciones de probabilidad correspondientes.

En total son 27 índices de los cuales 11 están relacionados con la precipitación. Entre estos están: El día y los 5 días más lluviosos en cada mes (RX1day y RX5day), el índice simple de intensidad diaria (SDII), el número de días con alta y muy alta precipitación (R10 y R20), los días secos y húmedos consecutivos (CDD y CWD), días muy húmedos y extremadamente húmedos (R95p y R99p), y por último la P anual (PCRPTOT), que bajo la suposición de condiciones estacionarias no debería tener tendencia.

Con respecto al cálculo de los índices de forma distribuida (en grilla), se han planteado en la literatura dos enfoques. El primero consiste en calcular los índices en cada estación y después interpolarlos, mientras que el segundo interpola las variables meteorológicas y posteriormente halla los índices en cada celda. Zhang et al. (2011) resaltan que los resultados del segundo enfoque deben parecerse más a los resultados producidos por modelos climáticos o de reanálisis y en este sentido esta es la técnica que se ha utilizado en el trabajo aquí reportado.

## 4. Metodología

A fin de realizar la evaluación propuesta, se plantea un enfoque retrospectivo, ya que se busca medir el error de dos series de tiempo con límites fijos.

Con base en los datos de P de los dos reanálisis y de la interpolación con KDE, se calcularon las series de tiempo de los índices mencionados en la sección 3, obteniéndose así la serie de tiempo de cada índice en cada celda. Posteriormente, se hicieron las comparaciones utilizando la métrica de Error Medio (ME), dado que esta brinda una idea general del error del producto de P respecto del observado, además de proporcionar el sesgo del valor del índice.

Adicionalmente, se analizaron las tendencias de algunos índices a lo largo del tiempo.

## 5. Resultados

Se muestran a continuación los resultados del índice R95tot de forma distribuida y la serie de tiempo de R95tot y PCRPTOT en una celda ubicada al norte de la cuenca. Se muestra el R95tot porque está relacionado con los valores extremos de precipitación, eventos que tienen un gran impacto sobre fenómenos como inundaciones. La Figura 1 muestra que el MSWEP tiene una buena representación de los días muy húmedos, excepto en las zonas de alta montaña como la Sierra Nevada, ubicada al norte de la región. Se pueden atribuir los grandes errores a la dificultad de los reanálisis para simular la P con orografía tan compleja como los Andes colombianos. La mayoría de las celdas tiene un exceso o subestimación de la P entre +150 y -100 mm/año en el periodo evaluado (66.8% de las celdas).

Los anteriores resultados concuerdan con el sesgo negativo en la cantidad de lluvia reportado para esta región por Rodríguez et al. (2017).

La Figura 2 muestra que las lluvias del producto WFDEI que superan el percentil 95, en general tienen un bajo desempeño en las mismas regiones que el MSWEP. No obstante, en este caso no se puede identificar si este error está relacionado con la alta orografía que se presenta en el territorio colombiano. Además, al comparar las dos figuras se observa que los errores son más altos en el WFDEI y también la cantidad de celdas con grandes sobreestimaciones es mayor. Esto puede deberse a que el WFDEI tiene



muchas más influencia de los resultados del reanálisis ERA-Interim que el producto MSWEP.

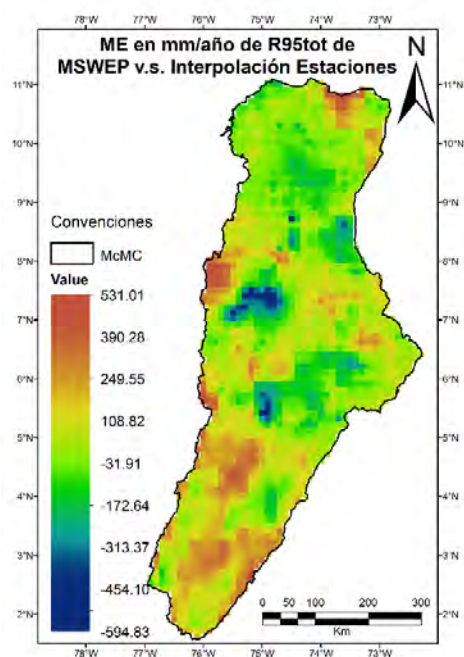


Figura 1. ME del MSWEP para la cantidad de lluvia en días muy húmedos R95tot en un año dado.

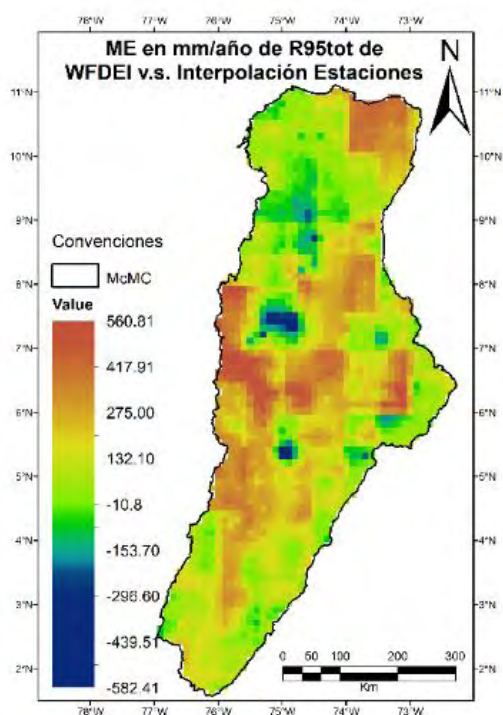


Figura 2. ME del WFDEI para la cantidad de lluvia en días muy húmedos R95tot en un año dado.

En la Figura 3 se pueden ver las series de días muy húmedos (R95tot), en una celda particular escogida al azar, ubicada en las coordenadas indicadas, en conjunto con la P total anual. Se observa que tienen una variación importante año a año y que para la celda analizada los valores de P del WFDEI siguen aproximadamente las variaciones presentes en la serie observada. En los primeros años analizados el MSWEP sigue la misma tendencia de los datos

observados, pero luego presenta una importante subestimación. También se evidencia que la R95tot es alta en los años en donde la P es alta (para la serie observada), que a su vez concuerda con los años en los que el Oceanic Niño Index ONI, asociado al fenómeno ENSO, indica fase fría o fenómeno de La Niña (1989, 1996, 1999, 2000, 2011). El conjunto WFDEI presenta sobreestimaciones en los años mencionados, pero también en años neutros conforme en lo reportado en el ONI.

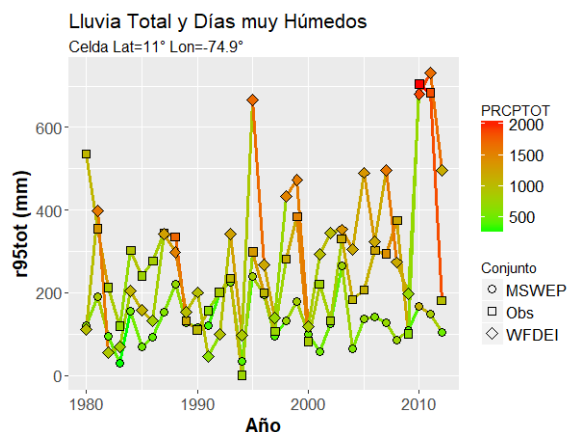


Figura 3. Variación de los índices R95tot y PRCPTOT en el periodo 1980-2012, para los tres conjuntos de datos.

## 6. Conclusiones

A partir del cálculo de índices se han evaluado en la McMC dos productos de precipitación provenientes de reanálisis (WFDEI y MSWEP) comparándolos con la interpolación de datos *in situ* efectuada con KDE.

Una buena representación de los días muy húmedos es importante para la cuantificación del recurso y para el análisis de inundaciones. Las validaciones de productos de P global, disponibles para diversas aplicaciones, son importantes para conocer sus limitaciones y para tener mayor certeza en los resultados derivados. Con los análisis de las Figuras 1 y 2 se concluye que, aunque hay sobreestimaciones, en la mayoría del territorio se tiene una buena correspondencia de los días muy lluviosos.

Para la celda analizada (Figura 3), se ve que hay una clara influencia de una gran cantidad de lluvias de los días muy húmedos sobre la precipitación total anual. En dicha celda el WFDEI tiene una mejor representación que el MSWEP, esto puede variar dependiendo de la celda analizada. Sin embargo, al comparar la Figura 1 y 2 se puede confirmar el MSWEP tiene una mayor cantidad de celdas con mejor desempeño que el WFDEI. Asimismo, se concluye que, aunque hay sobreestimaciones, en la mayoría del territorio se tiene una buena correspondencia de los días muy lluviosos.

Analizando otros índices no mostrados aquí, se puede apreciar una correlación del error con las zonas de alta montaña. Con base en los resultados aquí expuestos, se recomienda el uso del MSWEP, teniendo en cuenta que en zonas de alta montaña se

presentara una sobreestimación, principalmente en los días más húmedos.

## Agradecimientos

Se agradece al IDEAM por facilitar y estar presente en todo el proceso del proyecto E2O, al GIREH y a la YPN-Bogotá. El proyecto E2O ha recibido financiación del Séptimo Programa Marco de la Unión Europea para la investigación tecnológica, desarrollo y demostración, a través del Acuerdo de subvención No. 603608

## Referencias

Beck, Hylke E., Noemi Vergopolan, et al. 2017. «Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling». *Hydrology and Earth System Sciences* 21(12): 6201-17. <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/6201/2017/>.

Beck, Hylke E., Albert I.J.M. J. M. van Dijk, et al. 2017. «MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979–2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data». *Hydrology and Earth System Sciences* 21(1): 589-615. <https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/21/589/2017/>.

Chow, Ven Te., David; Maidment, y Larry Mays. 1988. *Applied Hydrology*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

Dinku, Tufa, Franklyn Ruiz, Stephen J. Connor, y Pietro Ceccato. 2010. «Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over Colombia». *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49(5): 1004-14.

Poveda, Germán, Peter R Waylen, y Roger S Pulwarty. 2006. «Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234(1): 3-27.

Rodríguez, Erasmo et al. 2017. «Combined use of local and global hydrometeorological data with regional and global hydrological models in the Magdalena - Cauca river basin, Colombia». En *EGU General Assembly 2017*, Viena, Austria, 10477.

Weedon, G.P. et al. 2014. «The WFDEI meteorological forcing data set: WATCH Forcing Datamethodology applied to ERA-Interim reanalysis data». *Water Resources Research* 50(9): 7505-14.

Zhang, Xuebin et al. 2011. «Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2(6): 851-70.

# Caracterización de presiones en cuencos de disipación de aliviaderos de vertido libre

## Characterization of pressures in plunge pools in free discharge spillways

(Recepción 31/01/2018; Aceptación 09/05/2018)

Marco F.<sup>1</sup>; Castillo L.G.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil  
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)  
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España  
Teléfono: 868071014  
Email: francisca.marco@upct.es

**Resumen.** El flujo en lámina libre constituye uno de los métodos de disipación de energía más utilizados en el sobrevertido de presas. Este artículo presenta la caracterización de las acciones hidrodinámicas que se originan en presas de fábrica cuando se produce un vertido libre por coronación. Supone una actualización de los coeficientes de presión dinámica media, así como un análisis de la distribución de presiones alrededor del punto de estancamiento de las Tesis Doctorales de Castillo (1989), Puertas (1994) y Carrillo (2014), complementándose con 111 ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

**Palabras clave.** Caracterización de presiones; cuenco de amortiguación; energía de disipación; sobrevertido.

**Abstract.** Nappe flow constitutes one of the energy dissipation methods used in the overtopping of dams. This paper presents the characterization of the hydrodynamic actions that occur in concrete dams when it makes a free discharge by crest. It is an update of the coefficients of mean dynamic pressures, as well as an analysis of the distribution of pressures around the stagnation point from the doctoral thesis of Castillo (1989), Puertas (1994) and Carrillo (2014), which are complemented by 111 tests carried out in the Hydraulic Laboratory of the Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT).

**Keywords.** Energy dissipation; overtopping; plunge pool; pressure characterization.

## 1. Introducción

Los chorros rectangulares constituyen una de las formas de desbordamiento más habitual en presas de fábrica. Por esta razón es posible la presencia de problemas de erosión potencial y socavación a pie de presa.

La elección del tipo de cuenco amortiguador a menudo suele ser una decisión técnico-económica.

Un adecuado diseño de la profundidad del cuenco, se basa en la determinación de la magnitud y frecuencia de la presión dinámica en el fondo del mismo en función de las características del chorro incidente (Castillo *et al.*, 2014).

En la literatura técnica existen diferentes formulaciones empíricas que caracterizan las presiones en los cuencos de disipación (Ervine *et al.*, 1997, Bollaert and Schleiss, 2003, Castillo *et al.*, 2014). Todas ellas se basan en estudios de modelos a escala en laboratorio dada la complejidad de instalar instrumentación en prototipos.

## 2. Caracterización del fenómeno

La disipación de energía en el vertido por coronación de presas de fábrica se puede dividir en cuatro fases que son: disgregación del chorro en el vuelo

(aireación más atomización), arrastre de aire cuando el chorro entra en el cuenco, difusión en el cuenco y finalmente impacto con la base del cuenco de disipación (Castillo *et al.*, 2014).

De cara al diseño, se definen las condiciones iniciales e incidentes (Fig. 1).

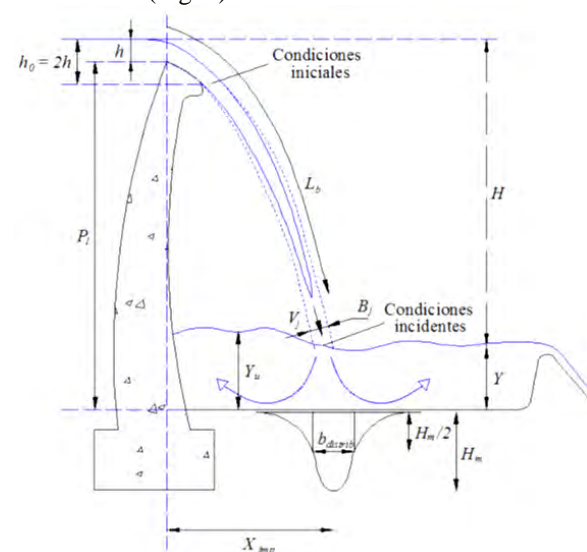


Figura 1. Esquema de aliviadero de vertido libre de presas bóveda (Carrillo, 2014, adaptado de Castillo, 1989).

Las condiciones iniciales se sitúan en la sección del chorro con altura  $z = -h$ , aguas abajo de la estructura de vertedero, siendo  $z$  la coordenada vertical con origen en la cresta de vertido y  $h$  la carga sobre vertedero. Dichas condiciones se definen mediante el valor de la velocidad media  $V_i = \sqrt{2gh_0}$ , siendo  $h_0$  el doble de la altura de energía  $h$ .

Las condiciones incidentes se localizan en la sección del chorro justo antes del impacto con la superficie del agua en el cuenco de disipación, y vienen definidas por la velocidad media  $V_j$  y el ancho del chorro en el impacto  $B_j = B_g + 2\xi$ , siendo  $B_g = \frac{q}{\sqrt{2gH}}$  el ancho por condiciones gravitatorias y  $\xi = 4\varphi\sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h})$  la distancia lateral de difusión del chorro por efectos de aireación y turbulencia. Donde  $q$  es el caudal específico y  $\varphi = K_\varphi T_u$ , siendo  $T_u$  la intensidad de turbulencia (0.012 para presas arco y 0.013 para presas de gravedad) y  $K_\varphi$  un parámetro experimental de valor 1.24 para el caso de chorros bifásicos y tridimensionales (Castillo *et al.*, 2014).

La longitud de rotura del chorro,  $L_b$ , es la distancia a partir de la cual el chorro se encuentra totalmente disgregado y formado por grandes gotas de agua que se van descomponiendo en gotas más pequeñas debido al rozamiento con el aire. Castillo *et al.* (2015) propusieron la siguiente ecuación  $L_b = 0.85 \cdot \frac{B_i \cdot F_i^2}{(K_\varphi \cdot T_u \cdot F_i^2)^{0.82}}$  donde  $B_i$  y  $F_i$  son el espesor del chorro y el número de Froude en condiciones iniciales, respectivamente.

### 3. Infraestructura de laboratorio

Se ha utilizado una infraestructura diseñada específicamente para el estudio de chorros turbulentos y su difusión en el cuenco de disipación de energía (Fig. 2).



Figura 2. Infraestructura del laboratorio para el estudio de chorros turbulentos y bifásicos.

Se obtienen registros de presiones instantáneas con una frecuencia de muestreo de 20 Hz, adquiriendo un total de 7200 datos por ensayo, siendo cada ensayo repetido tres veces. Se han ensayado 9 caudales entre 15.5 y 124.5 l/s para una altura fija de 2.19 m con colchones de agua que varían entre el impacto directo y 0.90 m, registrándose un total de 111 configuraciones.

### 4. Análisis y discusión de resultados

Los resultados obtenidos en laboratorio se han comparado con las mediciones realizadas por Castillo (1989), Puertas (1994) y Carrillo (2014).

El coeficiente de presión dinámica media ( $C_p$ ) mide la presión media alrededor del punto de estancamiento, y se define en función de la relación colchón de agua/espesor del chorro incidente ( $Y/B_j$ ) y la relación altura de caída/longitud de rotura ( $H/L_b$ ).

La desintegración de la parte compacta del chorro rectangular (zona de establecimiento del flujo) ocurre para un colchón aproximadamente de 5 veces el espesor del chorro incidente. Este límite permite identificar dos comportamientos claramente diferenciados (Fig. 3 y Fig. 4).

- Caso de colchón no efectivo ( $Y \leq 5B_j$ ):

Para este caso se pueden considerar dos situaciones:

Si  $H/L_b < 0.85$ :

$$C_p = 1 - 0.0037e^{5.2484\left(\frac{H}{L_b}\right)} \quad (1)$$

Si  $H/L_b \geq 0.85$ :

$$C_p = 0.456\left(\frac{H}{L_b}\right)^{-2.393} \quad (2)$$

La energía disipada  $ED$  (Fig. 3) es debida al proceso de aireación que sufre el chorro durante su caída, y al efecto del calado de agua que se genera aguas arriba del punto de incidencia del chorro. La curva de energía disipada se obtiene como la diferencia entre la unidad y el valor correspondiente de  $C_p$ .

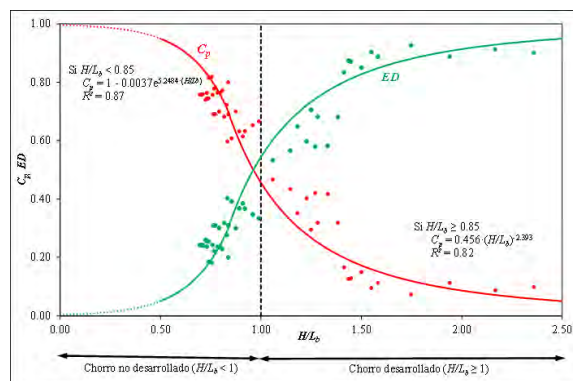


Figura 3. Coeficientes de presión dinámica media en la solera del cuenco de disipación para el caso del colchón no efectivo  $Y \leq 5B_j$ .

- Caso de colchón efectivo ( $Y > 5B_j$ ):

Se han considerado ocho familias de curvas agrupadas en función de sus relaciones  $H/L_b$  y que cumple la siguiente relación:

$$C_p = \frac{H_m - Y}{\frac{V_j^2}{2 \cdot g}} = ae^{-b\left(\frac{Y}{B_j}\right)} \quad (3)$$

Donde  $H_m$  es el valor medio del registro de presión. Los parámetros  $a$  y  $b$  y sus respectivos coeficientes



de correlación  $R^2$  se obtienen de las siguientes leyes exponenciales (Fig. 4).

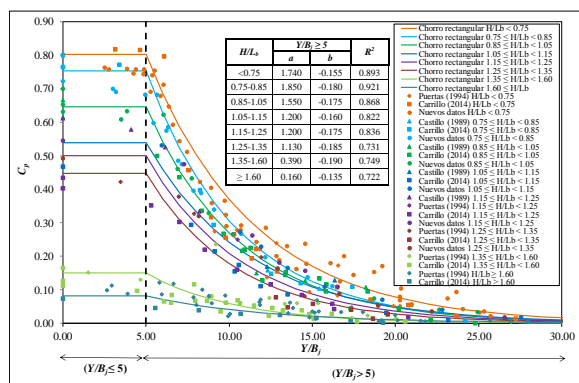


Figura 4. Coeficientes de presión dinámica media para todos los rangos establecidos.

La mayor parte de los datos medidos en esta campaña se encuentran en el entorno  $H/L_b < 0.75$ , por lo que se tiene una gran cantidad de datos que no alcanzan la longitud de desintegración.

Para el estudio de la distribución de presiones en el entorno del punto de estancamiento, Ervine *et al.* (1997) consideraron que la variación del coeficiente de presión dinámica media en la dirección longitudinal  $C_p(x)$  puede ser obtenida con la siguiente expresión general:

$$\frac{C_p(x)}{C_p} = e^{-K_2 \left(\frac{x}{Y}\right)^2} \quad (4)$$

donde  $x$  es la distancia horizontal al punto de estancamiento,  $Y$  el colchón de agua en el cuenco y  $K_2$  un parámetro de ajuste que varía entre 30 para calados poco profundos ( $Y/B_j \leq 4$ ) y 50 para grandes colchones, según Ervine *et al.* (1997).

Al realizar dicha distribución (Fig. 5) se observa que la distribución de Ervine *et al.* (1997) (válida para chorros circulares y para  $H/L_b \leq 0.5$ ) concuerda con los resultados obtenidos en laboratorio con chorros rectangulares poco aireados.

## 5. Conclusiones

Este trabajo es una actualización de estudios previos sobre las medidas de presiones en cuencos de disipación situados aguas abajo de un aliviadero de vertido libre. Los datos de las Tesis Doctorales de Castillo (1989), Puertas (1994) y Carrillo (2014) se complementaron con nuevos ensayos de laboratorio.

Las 475 configuraciones totales abarcan un rango de  $0.42 \leq H/L_b \leq 3.06$  para el estudio de presión en el punto de estancamiento, permitiendo obtener 8 familias que describen el comportamiento de  $C_p$ . Para la distribución de presiones en el entorno del punto de estancamiento se han obtenido resultados que concuerdan con los datos bien documentados de chorros circulares poco aireados ( $H/L_b \leq 0.50$ ).

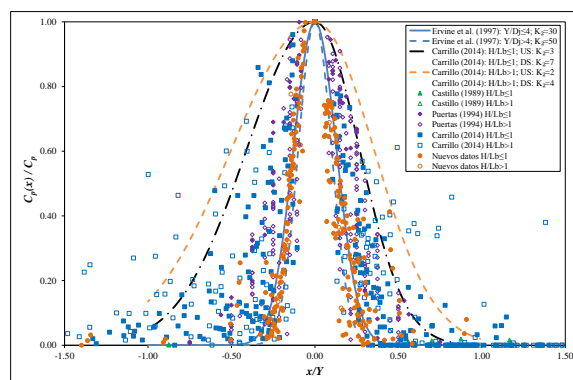


Figura 5. Distribución de presiones dinámicas medias alrededor del punto de estancamiento.

Para mejorar el diseño de estructuras de disipación de energía en presas de fábrica es necesario avanzar en el conocimiento y caracterización de las acciones hidrodinámicas. Será preciso incluir medidas de velocidades y de aireación en el chorro y en el cuenco de disipación.

Finalmente recordar la existencia de efectos de escala. Sin embargo, estos efectos están del lado de la seguridad y no son relevantes hasta una escala de Froude de 1:10.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

## Referencias

- Bollaert, E. F., & Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part 1: A state-of-the-art review". *Journal of Hydraulic Research*, 41(5), 451-464.
- Carrillo, J.M. (2014). "Metodología numérica y experimental para el diseño de los cuencos de disipación en el sobrevertido de presas de fábrica." *PhD Thesis*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Politécnica de Cartagena, España.
- Castillo, L. G. (1989). "Metodología experimental y numérica para la caracterización del campo de presiones en los disipadores de energía hidráulica. Aplicación al vertido libre en presas bóveda". *PhD Thesis*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Blázquez, A. (2014). "Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case". *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118.
- Ervine, D.A., Falvey, H.T. and Withers, W.A. (1997). "Pressure fluctuations on plunge pool floors". *Journal of Hydraulic Research*. 35(2), 257-279.
- Puertas, J. (1994). "Criterios hidráulicos para el diseño de cuencos de disipación de energía en presas bóveda con vertido libre por coronación". *PhD Thesis*. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

# Evaluación de la Cuenca subterránea Vento con el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP)

## *Evaluation of the Vento groundwater Basin with the model Water Evaluation and Planning system (WEAP)*

(Recepción 08/01/2018; Aceptación 11/04/2018)

Sánchez, Y.<sup>1</sup>; Méndez, O.<sup>2</sup>; Hernández A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Empresa Aguas de La Habana. Departamento GIS. Fomento y Recreo, Palatino, Cerro. La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Empresa Aguas de La Habana. Departamento Pitometría. Fomento y Recreo, Palatino, Cerro. La Habana, Cuba

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica de La Habana. Profesor Titular. Calle 114 #11901, Marianao, La Habana, Cuba.

Teléfono: (+53) 76434950.

Email: [yoany@ahabana.co.cu](mailto:yoany@ahabana.co.cu)

**Resumen.** La modelación de escenarios futuros que incluyan aspectos de demandas, infraestructuras y variables hidro-meteorológicas en la evaluación y administración del agua en la cuenca subterránea Vento resulta novedosa. La investigación propone el uso del modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP) con el objetivo de evaluar potencialidades y limitaciones para su desarrollo. Se modelan 5 años hidrológicos y se calibra a partir de mediciones existentes y resultados del modelo, obteniéndose un coeficiente NSE de 0.99. Los escenarios generados demuestran las potencialidades de WEAP para estructurar cambios en la infraestructura, programas de gestión de la demanda y reducción de pérdidas.

**Palabras clave.** Abastecimiento; cuenca; demanda de agua; evaluación y planeamiento de recursos hídricos.

**Abstract.** The modeling of future scenarios including the aspects of demand, infrastructure and hydro-meteorological variables in the water evaluation and planning of the Vento groundwater basin results groundbreaking. The research proposes the use of the Water Evaluation and Planning System (WEAP) with the objective of evaluating potentials and limitations for its development. 5 hydrological years are modeled and the calibration is made from the model's existing measurements and results, which results in a NSE ratio of 0.99. The scenarios generated show WEAP's potentials for implementing changes on the infrastructure, the demand management and the loss reduction programs.

**Key words.** Supply; basin; water demand; evaluation and planning of water resources.

## 1. Introducción

La cuenca subterránea Vento forma parte de la cuenca Almendares-Vento reconocida por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH) como cuenca de Interés Nacional (García Fernández & Gutiérrez Díaz, 2017). Se ubica en la región occidental de Cuba, en la vertiente Norte del país (Figura 1).

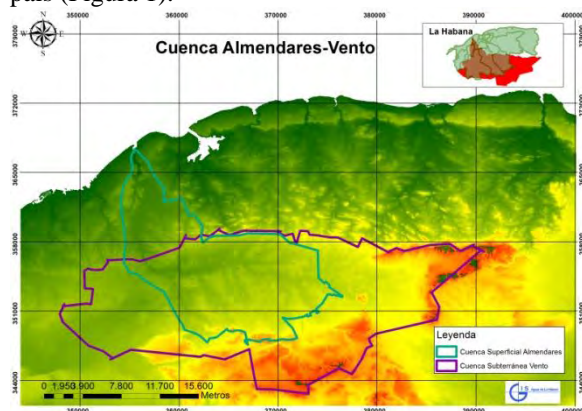


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Vento.

La cuenca hidrográfica Almendares abarca una extensión de 422 km<sup>2</sup>. Su red hidrográfica la constituyen numerosos arroyos de carácter

intermitente. Su río principal es el Almendares con una longitud de 49,8 km (Rivera, 2009).

La cuenca subterránea Vento se divide en dos grandes regiones: la cársica y la no cársica. Predominan las pendientes suaves y de llanuras onduladas y se destaca un sistema de bloques sub-horizontales, monoclinales y una estratificación bien marcada (Valcarce Ortega, Rosa M, et al, 2007).

Vento está formado por sedimentos carbonatados, carbonatados terrígenos y terrígenos del mioceno inferior compuestos por sedimentos arenos-arcillosos, arcillas y depósitos lacustres del cuaternario. Sus recursos aprovechables están estimados en unos 287 millones de m<sup>3</sup>/año (Rivera, 2009).

La cuenca es de gran importancia en el abastecimiento de agua potable a La Habana al constituir el 48% de los volúmenes extraídos (Rivera, 2009) para satisfacer la demanda de 1 479 750 habitantes (Aguas de La Habana, 2016). Resulta fundamental analizar las variaciones en la dinámica Oferta-Demanda (OD) influenciada, entre otros aspectos, por la variabilidad climática, la influencia de la infraestructura de conducción y el crecimiento poblacional en el área que se abastece de la cuenca y teniendo un enfoque eco sistémico.





### 3. Limitaciones actuales de la evaluación de la cuenca subterránea Vento con el modelo WEAP.

Las pérdidas de agua en el sistema, la curva de modulación y las demandas, fueron estimadas en base a criterio de expertos dada la insuficiencia de información y mediciones concluyentes. Importante resulta la limitante en cuanto a la respuesta hidrogeológica de la cuenca al no estar conectada con un modelo que refleje la dinámica subterránea, la respuesta ante recarga-extracción, las fronteras y la relación directa con propiedades hidrogeológicas de flujo (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento).

De igual forma, la ausencia de estaciones de aforo en el sistema fluvial Almendares es un factor que limita la calibración a partir de la respuesta hidrológica de la cuenca.

Las soluciones de estas deficiencias son necesarias para acometer desarrollos del modelo WEAP de la cuenca subterránea Vento desde la perspectiva de la gestión integral del agua.

### 4. Resultados. Generación de escenarios con WEAP-Vento.

A partir del modelo calibrado se generan escenarios futuros, mostrándose las potencialidades de WEAP para la toma de decisiones ante cambios climáticos y/o de ordenamiento territorial y su efecto en la planeación y administración del agua enfocados en la operación y gestión de abastecimientos.

En el primero de los escenarios se estimó un aumento hipotético de la población de un 5% para el SD Sistema Central en el AH 2004-2005 comprobándose su influencia en el incremento de la Demanda según se muestra la Figura 4.

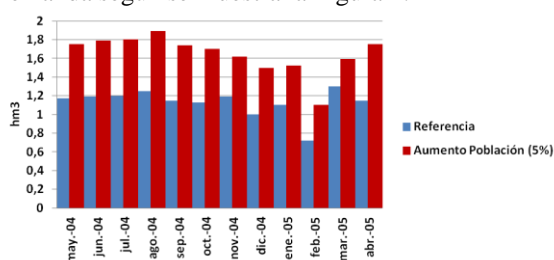


Figura 4. Incremento de la Demanda para AH 2004-2005, SD Sistema Central según aumento poblacional previsto.

A partir del incremento en la demanda experimentado en el primer escenario, se planteó la necesidad de recuperar agua para evitar el uso de fuentes alternativas. Fueron modelados escenarios a partir de la introducción de estrategias de Reducción de Pérdidas (RP) y programas de Gestión de la Demanda (GD). Los resultados mostraron potencialidades de WEAP para conectar la dinámica productiva de la cuenca Vento con la distribución y gestión de la demanda a través de la generación de escenarios.

De manera especial se generó un escenario que demostró estrategias para acercar la demanda prevista en la Norma Cubana NC 973 (NC 973, 2013) a valores reales de explotación de los sistemas de acueducto en Cuba. La NC 973 establece que la demanda en Cuba debe ser 360 litros por persona por día (lppd) para sistemas de acueductos con índices de pérdidas admisibles de hasta un 8% como valor máximo. En la actualidad lo normado no se cumple debido a que las demandas responden a volúmenes de agua producida que tienen implícito elevadas pérdidas de agua y que imposibilita un rendimiento efectivo de la red, o sea, la capacidad de producción de la fuente de abasto gobierna la demanda.

El último de los escenarios generados exploró estrategias, a partir del AH 2004-2005 y el SD Sistema Central, para aumentar la satisfacción de la demanda luego de haber establecido la condicionante del cumplimiento de la NC 973 aún con las deficiencias del sistema. A través de la generación de escenarios, se demuestran estrategias en función de la introducción de. Las estrategias tuvieron en cuenta la GD (%) y RP (%) como indicadores.

- Estrategia 1: RP: 40% GD: 5%
- Estrategia 2: RP: 30% GD: 10%
- Estrategia 3: RP: 20% GD: 20%
- Estrategia 4: RP: 8% GD: 30%

La Figura 5 muestra los resultados de la generación del escenario.

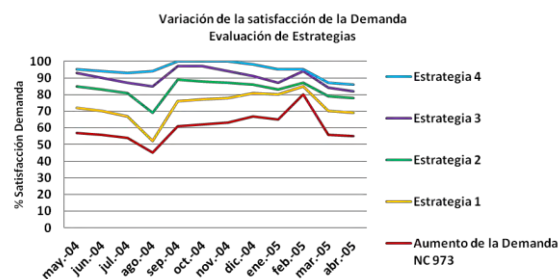


Figura 5. Variación de la satisfacción de la Demanda a partir de escenarios.

A partir de la línea base simulada como *Aumento de la Demanda NC 973* se evidencia la recuperación del porcentaje de satisfacción de la demanda en la medida en que las pérdidas se acercan a valores establecidos por la NC 973 ayudados por programas de GD. La *Estrategia 4* contribuye a definir inversiones necesarias para elevar los rendimientos en los sistemas de acueducto, así como para reducir las demandas a valores normados.

### 5. Conclusiones

El modelo WEAP de la cuenca Vento fue calibrado atendiendo a parámetros relacionados con la demanda en un año hidrológico seco, reflejándose una tendencia similar en cuanto al comportamiento del déficit de agua producida del sitio de demanda



del Sistema Central, lo que avala la factibilidad de su uso y posterior desarrollo.

Quedan establecidas las limitaciones actuales del modelo para análisis integrales de mayor alcance basadas en la ausencia de estaciones de aforo en el río Almendares, escasas mediciones de demandas y del comportamiento de los patrones de consumo.

A partir de la generación de escenarios, se logra ejemplificar las potencialidades de WEAP para la toma de decisiones ante cambios futuros en la planeación y administración integral de la cuenca y en la operación y gestión del sistema de acueducto, mostrándose además el impacto de estrategias previstas para acercar la demanda en la NC 973 a valores reales de explotación en los sistemas de acueducto.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Empresa Aguas de La Habana por la confianza y el patrocinio para la realización de esta investigación, a todas las instituciones y personas que aportaron a estos resultados y al PhD. Francisco Flores-López del Stockholm Environment Institute por el asesoramiento y los consejos oportunos.

## Referencias

- Aguas de La Habana, S. d. (2016). "Producción de Agua". Dirección de Explotación, Empresa Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.
- CITMA-IGT (2014). "Sistema de Modelación para la gestión del agua. Componente Agua para el desarrollo (WATER4DV)". La Habana, Cuba. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Instituto de Geografía Tropical (IGT) (Inédito)
- CUBAENERGIA. (2012). "Pronóstico de calidad del aire local y clima regional. Impactos en sistemas energéticos, agua y uso de suelos". La Habana, Cuba: CUBAENERGIA.
- Cuevas-Ojeda, J. L., Gutiérrez Pérez, B., Polo Gonzáles, B., Jaimez Salgado, E., Núñez Lafitte, M., Guerra Oliva, I., y otros. (2011). "Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares-Vento. SIG y Multimedia". (I. C. 2011, Ed.) La Habana, Cuba: Instituto de Geofísica y Astronomía.
- García Fernández, J. M., & Gutiérrez Díaz, J. B. (2017). "A 20 Años de la Creación de los Consejos de Cuenca". I Taller de Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas Cubagua 2017. La Habana: Obras. ISBN: 978-959-247-156-6.
- Hernández, A., Llanusa, H., & Dilla, F. (2003). "Modelación de la interrelación entre la presa Ejército Rebelde y la Cuenca Vento. Impactos ambientales evaluados con modelos matemáticos realizados en acuíferos cubanos". Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
- Hervis, G., & otros. (2017). "Aplicación del Modelo WEAP, como herramienta para la gestión
- integrada de los recursos hídricos frente a los impactos del cambio climático". I Taller de Gestión Integral de de Cuencas Hidrográficas. Cubagua 2017. La Habana: Obras. ISBN 978-959-247-156-6.
- NC 973, N. C. (2013). "Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones urbanas". Norma Cubana. La Habana, Cuba.
- Lapinel, et al. (2014). "Metodología para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por intensa sequía". En Metodologías para la determinación de riesgos de desastres a nivel territorial. Parte I. Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del CITMA. PNUD-Cuba.
- León, M., & Leslie, F. (2000). "Gestión Integrada y Protección Hidroecológica Vento-Almendares". La Habana: Instituto de Geofísica y Astronomía. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- López Infante, E. (1992). "Condiciones Hidrogeológicas de las Cuencas del Escurrimiento Subterráneo Recursos de explotación. Esquema General para el aprovechamiento Integral de los recursos Hídricos y Agrarios de las provincias La Habana y Ciudad de La Habana". La Habana: INRH.
- PNUD-Cuba (2008), "Actividades de apoyo para preparar la Segunda Comunicación Nacional de la República de Cuba con arreglo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". PNUD-MINVEC-CITMA. La Habana, PNUD-Cuba.
- Purkey, et al. (2013). "Una presentación de WEAP: Una herramienta para ayudar la gestión integrada de los recursos hídricos en frente del Cambio Climático". Grupo Agua, Stockholm Environment Institute. USA.
- Rivera, V. (2009). "Interrelación Canal Albear, Presa Ejército Rebelde y parámetros de control de la Cuenca Almendares-Vento". Máster en Manejo Integral del Agua, Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría. La Habana, Cuba.
- UNOPS-PNUMA. (2013). "Estudio de Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Apurímac EBHICA". Recuperado el 10 de Septiembre de 2016, de <http://www.balancehidrico.org>
- Valcarce Ortega, Rosa M, et al. (2007). Geofísica de pozos y diagnosis matemática en el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos. La Habana, Cuba: CUJAE.
- Vasallo Aguila, D. (2003). "Modelación de la interacción entre la presa Ejército Rebelde y la Cuenca Vento. Búsqueda y procesamiento de la información". La Habana: Facultad de Ingeniería Civil. ISPJAE.