
REVISTA
HIDROLATINOAMERICANA
DE
JÓVENES
INVESTIGADORES Y
PROFESIONALES

Volumen 1 – 2017
ISSN: 2520-2960



International Association
for Hydro-Environment
Engineering and Research

Supported by
Spain Water and IWHR, China



Young
Professionals
Network

Supported by
Spain Water and IWHR, China



Revista Hidrolatinoamericana
de Jóvenes Investigadores y
Profesionales

ISSN: 2520-2960 (digital)

Mayo de 2017

Director y Editor
José M. Carrillo Sánchez

Editores Asociados
Edwin Y. Saavedra Cifuentes
Juan T. García Bermejo
Patricio Ortega Lara
Yoch Ponte Torres

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

Supported by Spain Water and
IWHR, China

Sumario

- i Sobre la División Regional Latinoamericana (LAD-IAHR)
- ii Sobre la revista
- iii Comité Editorial

- 1 Retos actuales en la caracterización de los flujos agua-aire en grandes obras hidráulicas / Current challenges in the characterization of air-water flows in large hydraulic structures
(Valero, D.)
- 5 Restauración morfológica de ríos en Colombia: guía para la conservación, mejora y reconfiguración de hábitats nativos / Morphological restoration of rivers in Colombia: guide to conservation, improvement and restoration of native habitats
(Zapata, J.; Noack, M.)
- 9 Longitud de reja de un sistema de captación de fondo / Rack length of a bottom intake system
(Haro, P.L.; García, J.T.; Castillo, L.G.)
- 13 El uso de GLUE como algoritmo de aproximación al frente de Pareto: Aplicación al modelo hidrológico de Thomas (abcd) / The use of GLUE as an approximation algorithm for the Pareto front: Application to the abcd hydrological model of Thomas
(Duque Gardeazábal N.; Vega Viviescas C.; Obregón Neira N.)
- 16 Análisis del transporte de solutos en medios porosos utilizando procesamiento de imágenes de un modelo físico 2D (sand box) / Analysis of the transport of solutes through a porous medium using image-processing of a 2D physical model (sand box)
(Bayuelo Sierra, A.J.; Lora Ariza, B.J.; Lora Castro, B.J.; Castro Alcala, E.; Donado Garzón, L.D.)
- 20 Disipación de energía en cuencos con pendiente adversa / Reverse Slope Energy Dissipators
(Plua, F.; Hidalgo, X.)
- 23 Diseño de instalaciones hidráulicas experimentales con apoyo de la dinámica de fluidos computacional (CFD) / Design of hydraulic installations using computational fluid dynamics (CFD)
(Bayón, A.; Vallés Morán, F.J.; Macián Pérez, J.F.; López Jiménez, P.A.)
- 27 Implementación de un modelo de autómatas celulares para simular transporte de solutos a través de un medio poroso / Implementation of a cellular automata model to simulate the transport of solutes through a porous medium
(Lora Ariza, B.J.; Bayuelo Sierra, A.J.; Lora Castro, B.J.; Donado Garzón, L.D.)

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, hidroeinformática 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 15 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 (RIBAGUA, JHR, JAWER, etc).

Pensamos que esta revista de publicación anual es una buena 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 total de 3 páginas.

Las instrucciones de estilo y formato pueden descargarse como 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 ser indexada y alcanzar un buen nivel de clasificación y de citas.



Comité Editorial

Editor: José M. Carrillo Sánchez

Editores asociados (por redes YPN)

IAHR Bogota Young Professionals Network

D. Edwin Y. Saavedra Cifuentes

IAHR South East Spain Young Professionals Network

D. Juan T. García Bermejo

IAHR Escuela Politécnica Nacional Young Professionals Network

D. Patricio Ortega Lara

IAHR Universidad Nacional Mayor de San Marcos Young Professionals Network

D. Yoch Ponte Torres

Comité Científico

D. Antonio Preziosi Ribero

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

D. Jorge Molines Llodrá

Universidad Politécnica de Cartagena (España)

D. Antonio Viguera-Rodríguez

Universidad Politécnica de Cartagena (España)

D. Leonardo David Donado Garzón

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

Dña. Beatriz Nácher Rodríguez

Universitat Politècnica de València (España)

D. Luis G. Castillo Elsitdié

Universidad Politécnica de Cartagena (España)

D. Carlos Carbonel Huamán

Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Perú)

Dña. María Cristina Arenas Bautista

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

D. Christian Frias Pérez

Barr Engineering Co. (Estados Unidos de América)

Dña. Sarai Díaz García

Universidad de Castilla La Mancha (España)

D. Edwin Casa Tipán

Escuela Politécnica Nacional (Ecuador)

D. Sergio Salazar

Universidad Nacional de Colombia (Colombia)

D. Jorge Alberto Escobar Vargas

Pontificia Universidad Javeriana (Colombia)

Revista Hidrolatinoamericana publica bajo la licencia



Retos actuales en la caracterización de los flujos agua-aire en grandes obras hidráulicas

Current challenges in the characterization of air-water flows in large hydraulic structures

(Recepción 11/12/2016; Aceptación 10/02/2017)

Valero, D.^{1,2}

¹ FH Aachen, University of Applied Sciences, Hydraulic Engineering Section (HES), Bayernallee 9, Aquisgrán 52066, Alemania

² University of Liège (ULg), Hydraulics in Environmental and Civil Engineering (HECE), Chemin des Chevreuils 1, Bat B52/3 +1, Lieja, Bélgica
Teléfono: +49 241 6009 51180
Email: valero@fh-aachen.de

Resumen. En este estudio se analizan brevemente los retos actuales en la descripción y modelización de los flujos agua-aire. Se analizan los estudios publicados durante los últimos cuatro años en cinco de las principales revistas internacionales y se discuten los principales avances en los temas con mayor producción científica. Los temas de mayor interés son: aliviaderos escalonados, burbujas en flujos a presión, modelación numérica e instrumentación.

Palabras clave. Aliviaderos escalonados; golpe de ariete; instrumentación; modelación numérica; aireación.

Abstract. Present literature on air-water flows is briefly reviewed, including articles of the main five international Journals published along the last four years. Main advances in the most fruitful topics related to air entrainment are discussed. Main areas of interest are: stepped spillways, bubbles in pipe flows, numerical modelling and instrumentation.

Keywords. Stepped spillways; water hammer; instrumentation; numerical modeling; self-aeration.

1. Introducción

El estudio de los flujos agua-aire en grandes obras hidráulicas empieza con las observaciones de Ehrenberger (1926). Desde entonces la conceptualización de los flujos agua-aire ha ido cambiando poco a poco, sin embargo, en muchos aspectos, el estudio de Straub & Anderson (1958) ya estableció muchos de los conceptos que todavía son ampliamente aceptados. El interés de los investigadores ha ido *in crescendo* y ahora son muchos los retos que se presentan a la comunidad científica.

El trabajo experimental y teórico de Killen (1968), el experimental de Cain (1978) a escala de prototipo, la formulación de Woods et al. (1983), acompañado de la monografía de la IAHR de Woods (1991) establecieron unas sólidas bases para esta disciplina. Hacia finales de los años 90 y principios del nuevo siglo, los trabajos del Prof. Chanson —entre otros Chanson (1997), Chanson & Brattberg (2000) y Chanson & Toombes (2002)—, introducen extensas bases de datos experimentales y vislumbran los primeros trabajos sobre evaluación de las propiedades turbulentas en flujos altamente aireados.

Recientemente, Chanson (2013) presentó un *vision paper* sobre los últimos trabajos publicados. Sin embargo, en los últimos 3-4 años se han presentado numerosos trabajos. En este artículo se analizan sucintamente los trabajos publicados en las

principales revistas internacionales durante los últimos cuatro años y se analizan los principales subtemas tratados.

2. Producción científica

En este trabajo se han analizado las publicaciones realizadas durante el periodo enero 2013 – octubre 2016 de las siguientes revistas: *Journal of Hydraulic Research* (JHR), *Journal of Hydraulic Engineering* (JHE), *Environmental Fluid Mechanics* (EFM), *International Journal of Multiphase Flows* (IJMF) y *Experiments in Fluids* (ExpF); con un total de 121 artículos, incluyendo discusiones pero no correcciones de errores (*erratum*).

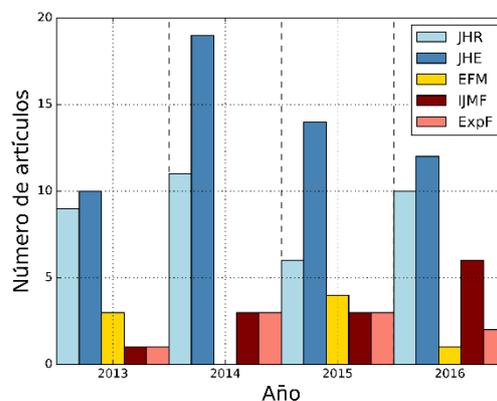


Figura 1. Producción científica sobre flujos agua-aire con implicaciones en ingeniería civil en las principales revistas.

Estas revistas internacionales han sido seleccionadas en base a su impacto, continuidad y gran número de aportaciones significativas durante las últimas décadas. Sin embargo, y tal y como es evidente, otras revistas existen con contribuciones de relevancia. Dentro de los artículos publicados en IJMF, se han filtrado aquellos que, a pesar de tratar temas relacionados con flujos multifase, no tienen una conexión directa con la ingeniería civil (e.g.: ingeniería química o nuclear).

En la Fig. 1 se observa claramente que son JHE y JHR las dos revistas con mayor cantidad de artículos. Además, la temática de estas dos revistas es bastante transversal. EFM, IJMF y ExpF se mantienen en un segundo plano con una temática más especializada.

3. Retos actuales

En base a los artículos seleccionados, se pueden distinguir varias líneas prioritarias de investigación.

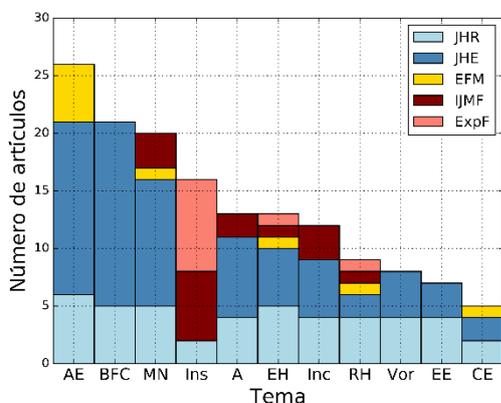


Figura 2. Distribución de trabajos publicados por temática (ver Tabla 1).

Tabla 1. Códigos de las temáticas presentadas en la Fig. 2.

Código	Descripción
AE	Aliviaderos escalonados.
BFC	Burbujas en flujos confinados.
MN	Modelación numérica.
Ins	Instrumentación.
A	Aireadores, deflectores, trampolines, etc.
EH	Otras obras hidráulicas.
Inc	Determinación del inicio de aireación.
RH	Resalto hidráulico.
Vor	Vórtices.
EE	Efectos de escala.
CE	Chorros y erosión.

3.1. Aliviaderos escalonados (AE)

Los aliviaderos escalonados acaparan el mayor número de artículos publicados en los últimos 4 años. Recientemente, la atención se ha centrado en la zona no aireada y en la determinación del punto de inicio

de la aireación. La determinación de criterios sencillos de diseño y las propiedades turbulentas del flujo aireado son otros de los subtemas más tratados. Sin embargo, y a efectos prácticos, se trata de un subtema que parece haber alcanzado la madurez (Chanson & Toombes 2002; Boes & Hager, 2003; Amador *et al.*, 2006; Pfister & Hager, 2011; Bung, 2011).

3.2. Burbujas en flujos confinados (BFC)

El movimiento de burbujas de aire en flujos a presión y sus implicaciones en el golpe de ariete son el segundo subtema más comúnmente encontrado en estas revistas. Existen, además, una gran cantidad de trabajos sobre burbujas en flujos confinados en el IJMF que, sin embargo, no se han tenido en cuenta en este análisis al estar más enfocados a otras disciplinas.

3.3. Modelación numérica (MN)

La modelación numérica de obras hidráulicas con flujos agua-aire aparece como un tema de actualidad. Sin embargo, los esfuerzos de los investigadores son muy dispersos, correspondiendo cada estudio a tipos de flujos distintos (e.g.: resalto hidráulico, golpe de ariete, aliviaderos escalonado, etc.).

La principal dificultad que aparece en la modelación de flujos aireados es la gran diferencia de escalas: por un lado, las que constituyen el flujo medio y, por otro, las involucradas en el proceso de aireación del flujo (Valero & García-Bartual, 2016).

3.4. Instrumentación (Ins)

Es el único tema que no tiene representación en el JHE. Además, parece que hay cierta preferencia por ExpF y IJMF, en lugar del JHR, siendo las únicas contribuciones en esta revista las de Bung (2013) y Bung & Valero (2016).

Los trabajos en instrumentación se centran bien en desarrollar nuevas metodologías o en reinterpretar técnicas comúnmente aplicadas. Las técnicas intrusivas siguen siendo las más comúnmente empleadas pero, cada vez más, ganan peso otros métodos como pueden ser los métodos ópticos.

En los flujos aireados, a diferencia de en los problemas analizados en la hidráulica clásica, los métodos basados en correlación cruzada han presentado grandes dificultades (Bung & Valero 2015) debido al resultante conflicto en el uso de haces de luz láser y la extremadamente grande densidad de “partículas” que aparecen y desaparecen o cambian completamente el patrón de reflexión de la luz en cada par de imágenes. Parece que esto se resuelve parcialmente usando técnicas basadas en Visión por Computadora (Bung & Valero, 2016), lo cual está levantando cierto interés en investigadores que tradicionalmente han optado por métodos intrusivos (Zhang & Chanson, 2017).

3.5. Aireadores (A)

Los aireadores, deflectores, trampolines y otras estructuras ubicadas en grandes presas, bien para airear o para romper el chorro, han dado lugar a un considerable número de publicaciones. El estudio de las trayectorias y del grado de aireación suelen ser los resultados más comúnmente tratados. Los trabajos sobre chorros y la consecuente erosión (CE) podrían estar en cierto modo relacionados, sin embargo, se han decidido incluir por separado.

3.6. Otras obras hidráulicas (EH)

Han sido comunes los estudios en otros tipos de obras hidráulicas donde la aireación puede tener lugar ocasionalmente. Entre ellos se encuentran los pozos de disipación, *roll waves* en aliviaderos y estudios en canales de gran pendiente. Destacan también algunos trabajos con carácter puramente generalista.

3.7. Determinación del punto crítico de reaireación (Inc)

Es de especial interés conocer bajo qué circunstancias tiene lugar la reaireación, tanto por sus efectos beneficiosos para la estructura (protección contra cavitación) como por sus efectos perjudiciales (vórtices en tomas de bombeo). La mayoría de estudios presentan relaciones experimentales, siendo escasos los trabajos de marcado carácter teórico (Valero & Bung, 2016; Meireles *et al.* 2014). Este sigue siendo uno de los grandes misterios sin resolver siendo posiblemente el tema que presenta las teorías más eclécticas.

3.8. Resalto hidráulico (RH)

Es destacable el reducido número de trabajos en resalto hidráulico, al menos en comparación con las pasadas décadas. La gran mayoría de los trabajos más recientes sobre resalto hidráulico se centran en la determinación de las escalas turbulenta haciendo uso de matrices de sensores sincronizados. Sin embargo, el estudio de la turbulencia en resaltos hidráulicos se inició hace varias décadas (Rouse *et al.*, 1958) y, probablemente, alcanzó su madurez con los trabajos de Long *et al.* (1991), Hager (1992) y Chanson & Brattberg (2000).

3.9. Vórtices (Vor)

Los estudios sobre vórtices recogen trabajos experimentales, numéricos, teóricos y sobre efectos de escala. Por lo tanto, no parece haber una preferencia en el estudio de este subtema.

3.10. Efectos de escala (EE)

Tal vez uno de los subtemas más importantes y de los menos tratados debido a su gran complejidad y a la dificultad de encontrar instalaciones por duplicado a distinta escala. El estudio de los efectos de escala se

convierte en necesario para conocer cómo los estudios sobre aireación son aplicables a escalas de prototipo. Los flujos aireados muestran mayor sensibilidad a la escala del modelo que otros tipos de estudios experimentales.

3.11. Chorros y erosión (CE)

Durante el vertido libre por coronación en presas se genera un chorro altamente energético que puede romper antes de impactar con la masa de agua inmediatamente aguas abajo. En este campo, son destacables los trabajos de Ervine *et al.* (1980) y Ervine & Falvey (1987) en la determinación de la rotura del chorro. Otros trabajos destacables enfocados a la determinación de los esfuerzos generados por el chorro y la potencial erosión se pueden encontrar en Bollaert & Schleiss (2003), Duarte *et al.* (2015) y Castillo *et al.* (2015).

Agradecimientos

El autor agradece al Dr. Carrillo (UPCT) por sus esfuerzos al promover esta iniciativa y así hacer posible esta nueva revista.

Referencias

- Amador, A., Sánchez-Juny, M., Dolz, J. (2006). "Characterization of the Nonaerated Flow Region in a Stepped Spillway by PIV". *J. Fluids Eng.* 128(6), 1266-1273. doi: 10.1115/1.2354529
- Boes, R. M., Hager, W. H. (2003). "Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways". *J. Hydr. Eng.* 129(9), 661-670. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2003)129:9(661)
- Bollaert, E., Schleiss, A. (2003). "Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: A state-of-the-art review". *J. Hydr. Res.* 41(5), 451-464.
- Bung, D. B., (2011). "Developing flow in skimming flow regime on embankment stepped spillways". *J. Hydraul. Res.* 49(5), 639-648. doi: 10.1080/00221686.2011.584372
- Bung, D. B., (2013). "Non-intrusive detection of air-water surface roughness in self-aerated chute flows". *J. Hydraul. Res.* 51 (3), 322-329. doi: 10.1080/00221686.2013.777373
- Bung, D. B., Valero, D. (2015). Image processing for bubble image velocimetry in self-aerated flows. 36th IAHR World Congress, The Hague.
- Bung, D. B., Valero, D., (2016). "Optical flow estimation in aerated flows". *J. Hydraul. Res.* 54 (5), 575-580. doi: 10.1080/00221686.2016.1173600
- Cain, P., (1978). "Measurements within self-aerated flow on a large spillway". Ph.D. thesis, University of Canterbury. Civil Engineering.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., Blázquez, A. (2015). "Plunge pool dynamic pressures: a temporal analysis in the nappe flow case". *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118.



- Chanson, H., (1997). "Air bubble entrainment in open channels: flow structure and bubble size distributions". *Int. J. Multiph. Flow* 23 (1), 193–203. doi: 10.1016/S0301-9322(96)00063-8
- Chanson, H. (2013). "Hydraulics of aerated flows: qui pro quo?". *J. Hydraul. Res.*, 51 (3), 223–243.
- Chanson, H., Brattberg, T. (2000). "Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump". *Int. J. Multiph. Flow*, 26 (4), 583–607. doi: 10.1016/S0301-9322(99)00016-6
- Chanson, H., Toombes, L., (2002). "Air–water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations". *Int. J. Multiph. Flow* 28 (11), 1737–1761. doi: 10.1016/S0301-9322(02)00089-7
- Duarte, R., Schleiss, A. J., Pinheiro, A. (2015). „Influence of jet aeration on pressures around a block embedded in a plunge pool bottom". *Environmental Fluid Mechanics*, 15, 673–693.
- Ehrenberger, R., (1926). "Wasserbewegung in steilen Rinnen (Schußrinnen) mit besonderer Berücksichtigung der Selbstbelüftung". Hydrographisches Zentralbüro im Bundesministerium für Land- u. Forstwirtschaft.
- Ervine, D. A., Falvey, H. T. (1987). "Behaviour of turbulent water jets in the atmosphere and in plunge pools". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 83(1), 295–314.
- Ervine, D. A., McKeogh, E., Elsayy, E. M. (1980). "Effect of turbulence intensity on the rate of air entrainment by plunging water jets". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 69(2), 425–445.
- Hager, W.H., (1992). "Energy Dissipators and Hydraulic Jump". Springer, Water Science and Technology Library, Vol. 8.
- Killen, J. M., (1968). "The surface characteristics of self-aerated flow in steep channels". Ph.D. thesis, University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Meireles, I. C., Bombardelli, F. A., Matos, J. (2014). "Air entrainment onset in skimming flows on steep stepped spillways: an analysis". *J. Hydraul. Res.* 52(3), 375–385. doi: 10.1080/00221686.2013.878401
- Long, D., Rajaratnam, N., Steffler, P.M., Smy, P.R. (1991). "Structure of flow in hydraulic jumps". *Taylor & Francis J. Hydraulic Res.* 29(2), 207–218.
- Pfister, M., Hager, W.H., (2011). "Self-entrainment of air on stepped spillways". *Int. J. Multiph. Flow* 37 (2), 99–107. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.10.007
- Rouse, H., Siao, T. T., Nagaratnam, S. (1958). "Turbulence characteristics of the hydraulic jump". *Trans. ASCE* 124, 926–966.
- Straub, L. G., Anderson, A.G., (1958). "Experiments on self-aerated flow in open channels". *J. Hydraul. Div.* 84 (7), 1–35.
- Valero, D., Bung, D. B. (2016). "Development of the interfacial air layer in the non-aerated region of high-velocity spillway flows. Instabilities growth, entrapped air and influence on the self-aeration onset". *Int. J. Multiph. Flow* 84, 66–74. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.04.012
- Valero, D., García-Bartual, R., (2016). "Calibration of an air entrainment model for CFD spillway applications". *Adv. Hydroinformatics* 571–582. P. Gourbesville et al. Springer Water. doi: 10.1007/978-981-287-615-7_38
- Wood, I. R., (1991). "Air Entrainment in Free-surface Flows". Balkema.
- Wood, I. R., Ackers, P., Loveless, J., (1983). "General method for critical point on spillways". *J. Hydraul. Eng.* 109 (2), 308–312.
- Zhang, G., Chanson, H. (2017). "Application of local Optical Flow methods to high-velocity air-water flows: validation and application to skimming flows on stepped chutes". The University of Queensland, School of Civil Engineering, Report CH105/17.

Restauración morfológica de ríos en Colombia: guía para la conservación, mejora y reconfiguración de hábitats nativos

Morphological restoration of rivers in Colombia: guide to conservation, improvement and restoration of native habitats

(Recepción 05/12/2016; Aceptación 17/02/2017)

Zapata, J.¹; Noack, M.²

¹Esfera Ambiente y Paisaje S.A.S, Calle 45D No. 72-59, Medellín, Colombia

²Universidad de Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart, Alemania

Teléfono: (+49) 176 84848537

Email: juliana.zapata@esferambiente.com

Resumen. Esta guía es un análisis hidromorfológico completo de un río o tramo, cuyo propósito es hacer en primer lugar un estudio en la macro y mesoescala para identificar los “cuello de botella” del sistema, es decir las zonas con las condiciones menos naturales y más afectadas de un río, para luego hacer un estudio detallado de dichas zonas en la microescala a través de simulaciones hidromorfodinámicas y del hábitat. Finalmente se proponen medidas de restauración y mejoramiento de las condiciones físicas del río y del hábitat de las especies nativas.

Palabras clave. Restauración de ríos; hidromorfología; escala; modelación hidráulica 2D; modelación del hábitat

Abstract. This guide is a complete hydromorphological analysis of a river (or river reach), with the purpose of identifying the “bottle necks” of the system, this means the less natural and most affected zones; then perform a detailed study of the mentioned zones in the micro scale through hydromorphodynamic and habitat simulations; and finally, with the obtained results, propose measures to improve and restore the physical river conditions and therefore the habitat of the native species.

Keywords. River restoration; hydromorphology; scale; 2D hydraulic modeling; habitat modeling

1. Introducción

La necesidad de entender la relación entre los sistemas físicos y la ecología de los sistemas fluviales se ha convertido en un tema que cobra relevancia, por una parte por el incremento de la conciencia ambiental, que ha permitido llegar a reconocer la falta de una normativa para poder alcanzar el buen estado de los ríos. Este es el caso de la Directiva Europea Marco del Agua, la cual introdujo la hidromorfología como un aspecto indispensable para evaluar las condiciones ecológicas de un sistema fluvial. Como respuesta a la Directiva, los países miembros de la Unión Europea han desarrollado y adaptado métodos para cumplirla. Los elementos de dichos métodos fueron recopilados y se usaron para la construcción de una metodología que llene los vacíos de la actual normativa del agua en Colombia y que sea un soporte para la toma de decisiones en la planeación ambiental y la evaluación de impactos ambientales.

2. Contexto nacional e internacional

Para este proyecto se tomaron en cuenta las metodologías de Inglaterra, Alemania e Italia así como literatura científica reconocida para el análisis fluvial en la macro y mesoescala.

Después del estudio de normativas existentes en Colombia se identificó que es necesaria una metodología que contribuya al buen estado de las corrientes superficiales y a mantener el caudal mínimo después de su aprovechamiento, que garantice la oferta hídrica y la restauración ambiental. La nueva metodología deberá evaluar las condiciones hidromorfológicas, con la posibilidad de hacer un análisis antes y después de llevar a cabo un proyecto que afecte el sistema fluvial. Por otro lado, se identificó que se necesita una guía que considere las preferencias de hábitat de las especies nativas con el fin de tener una referencia de las condiciones del hábitat que se deben alcanzar o mantener. Finalmente es importante desarrollar una metodología que considere los tipos de morfologías que se presenten en Colombia y no restringir su aplicación a una sola.

3. Metodología para la restauración morfológica de ríos

La metodología comienza con el estudio en la macroescala, para identificar las condiciones generales de la zona de estudio (**paso 1**); luego en la mesoescala, con el fin de clasificar la corriente e identificar el sector con las condiciones más críticas de acuerdo con un sistema de puntuación (**paso 2**); por último se realiza un análisis en la microescala para determinar, a través de la modelación hidromorfodinámica y del hábitat, los problemas de



fondo que presente el tramo o los tramos críticos y con los resultados determinar las soluciones para mejorar las condiciones físicas del río y el estado ecológico de la corriente superficial (**paso 3**). Un esquema del procedimiento se presenta en la Fig. 1.

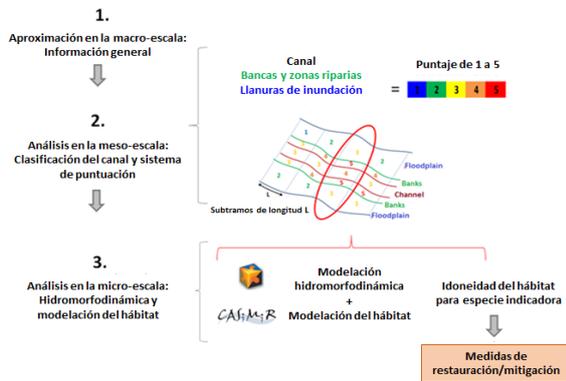


Figura 1.- Esquema de la metodología propuesta.

Paso 1: Aproximación en la Macroescala – información general

Este paso da una idea inicial de las características de la cuenca y la morfología fluvial, permite organizar y priorizar la evaluación, e ilustrar la distribución de ríos que pueden ser encontrados en el área de estudio. El tramo de estudio se divide en subtramos de una longitud aproximada de 20 veces el ancho del canal. Las subdivisiones deben tener en cuenta cambios significativos en la morfología, con el fin de que cada uno de ellos sean tan homogéneos como sea posible. Para cada una de las subdivisiones se debe identificar: longitud, área de la cuenca, pendiente, características del uso del suelo, número de canales (único o múltiple), material típico del lecho del río, patrón del lecho del río, elementos que dominan la rugosidad, fuentes dominantes de sedimentos y zonas de deposición, confinamiento.

Paso 2: Análisis en la Mesoescala – clasificación del canal y sistema de puntuación

En la mesoescala se pretende hacer una aproximación más cercana al tramo de estudio, para lo cual se hace una subdivisión del tramo, se clasifica el río con base en los esquemas de clasificación de ríos de Rosgen (1994), Montgomery & Buffington (1997) y Flores et al. (2006).

El análisis en la mesoescala comprende la puntuación de cada uno de los subtramos en tres componentes del sistema fluvial: canal, laderas y llanura de inundación. De esta forma, después de recorrer los parámetros del sistema de puntuación, se obtienen tres puntajes para cada una de las subdivisiones del tramo. Para este paso pueden usarse imágenes aéreas o satelitales en una escala entre 1:5000 y 1:10000, así como visitas de campo que ayuden a tener más información del sector.

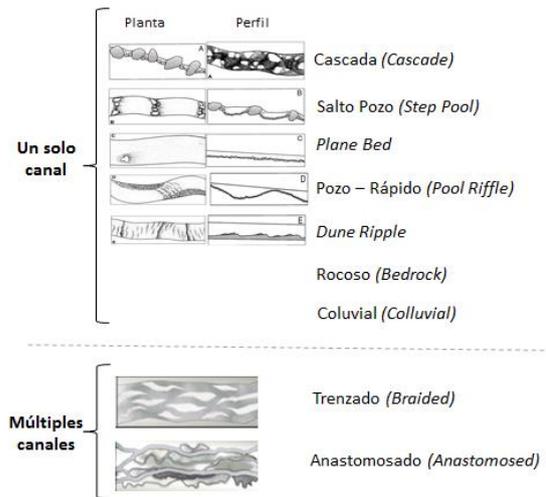


Figura 2.- Clasificación morfológica del canal.

Canal: La evaluación del canal incluye geometría del canal (G), patrón de erosión o depósito de sedimentos (E), sustrato (S), régimen de flujo o caudal (F), restos de material orgánico (árboles, ramas, estructuras para refugio de peces) (W) y continuidad longitudinal (L). Se observa en la Tabla 1 un ejemplo de los aspectos a evaluar de la geometría (G), las puntuaciones correspondientes y los tipos de morfología que aplican en la evaluación.¹

Tabla 1. Ejemplo de tabla.

	G1: Modificaciones al patrón natural del canal	Puntaje	Aplicación
Geometría del canal (G)	Ausencia de cambios artificiales en la heterogeneidad natural esperada para el tipo de río	1	Todos los tipos
	Alteración de una porción limitada del tramo ≤33%	3	
	Alteración de una porción significativa del tramo >33%	5	
	G2: Sección transversal	Puntaje	Aplicación
	Perfil natural - irregular	1	Todos los tipos
	Secciones transversales estándar – perfiles de cajón con superficie libre sin refuerzo	3	
	Secciones transversales estándar - perfiles de cajón con superficie libre con refuerzo	5	
	Secciones transversales estándar – traapezoidal, doble trapecio	5	
	G3: espaciamiento de los pozos	Puntaje	Aplicación
	Espaciamiento natural esperado de pozos de acuerdo con el tipo de río	1	Tipo dune ripple; Pool riffle; step pool; cascade
Espaciamiento de los pozos por fuera del rango normal	3-5		

Bancas: El análisis de las bancas está compuesto por estructuras de protección de bancas (BS) y tipo de vegetación o estructuras en la zona riparia (BV).

Llanura de inundación: se valora por los usos del suelo adyacente (A), las características de las zonas inundables (W) y el grado de libertad lateral que tenga el río hacia ambos lados (M).

¹ Ver Tablas de puntuación y factores ponderados completos en: Zapata, J., Noack, M., Wieprecht, S. (2015). “Guide for the river morphological restoration in Colombia: exemplary hydromorphological and habitat modeling”. Stuttgart.

Cada uno de los puntos descritos incluyen factores ponderados¹ que se combinan para dar un solo puntaje en cada sector por subtramo, es decir cada uno de los subtramos tendrá 3 puntuaciones (canal, bancas y llanuras de inundación si aplica) y se escogerá aquel que presente las condiciones más críticas (ver Tabla 2).

Tabla 2. Representación y significado del puntaje que define el estado morfológico en el canal, laderas y llanuras de inundación.

Puntaje	Color	Estado
1	Azul	Excelente
2	Verde	Bueno
3	Amarillo	Aceptable
4	Naranja	Pobre
5	Rojo	Malo

Paso 3: Análisis en la Microescala – Modelación hidromorfodinámica y del hábitat

El tramo (o tramos) con la puntuación más baja serán los cuellos de botella del sistema que necesitan un análisis más detallado para identificar las medidas que ayudarían a mejorar el sistema fluvial. Este paso se enfoca en un análisis enfocado en los procesos que ocurren en la microescala, por lo cual se requiere información detallada como datos de entrada para hacer modelación hidráulica bidimensional (o hidromorfodinámica en caso de tener información de sedimentos) y del hábitat. Para el modelo hidromorfodinámico son necesarias curvas de caudal, mediciones de niveles de agua con su respectiva información de caudal (con fines de calibración), secciones transversales o modelo de elevación digital y caracterización de sedimentos. Para el modelo del hábitat se debe disponer de los resultados del modelo hidromorfodinámico como datos de entrada (profundidad, velocidad y distribución de sedimentos. Ver Fig. 3 y Fig. 4), selección de una especie nativa de peces como indicador, y requerimientos del hábitat de la especie con respecto a profundidad, substrato y velocidad del río.

La información de la especie objetivo puede estar dada por curvas de preferencias o se pueden formar conjuntos difusos (*fuzzy sets*), que representan las preferencias de la especie de acuerdo a la evaluación de un experto. Los conjuntos a su vez conforman reglas difusas que se combinan en CASiMiR y dan como resultado una distribución de colores en una vista en planta del tramo, que indican desde el área más óptima del hábitat ilustrada con azul, pasando por verde, amarillo, rojo y finalmente gris que representa las peores condiciones del hábitat. Un ejemplo de una regla difusa y del proceso de CASiMiR y se ilustra en la Fig. 3 y Fig. 4 respectivamente.



Figura 3. Ejemplo de una regla difusa para CASiMiR

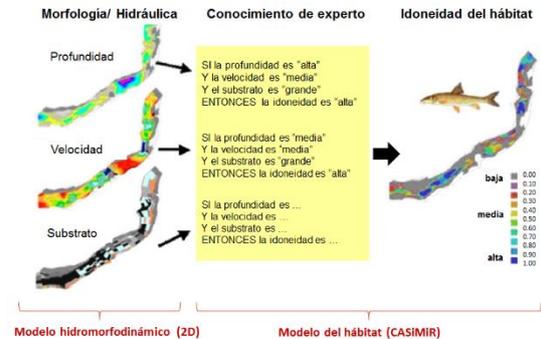


Figura 4. Aproximación de lógica difusa en el uso de CASiMiR (Schneider et al., 2010).

Además de la vista en planta, se puede evaluar la idoneidad del hábitat a través del Área Ponderada Usable (WUA, *Weighted Usable Area*) y el índice de idoneidad del hábitat (HHS, *Habitat Suitability Index*), ambos parámetros se muestran en forma gráfica y tabular. Un ejemplo de los resultados de la idoneidad del hábitat para la trucha en la fase de desove se presenta en la Fig. 5. En esta fase se observa que a medida que aumenta el caudal, disminuye la idoneidad del hábitat (a) y disminuyen las áreas aptas (áreas verdes y amarillas) para las huevas de truchas (c y d), las cuales necesitan tanto profundidades y velocidades bajas, como también un mínimo caudal para sobrevivir.

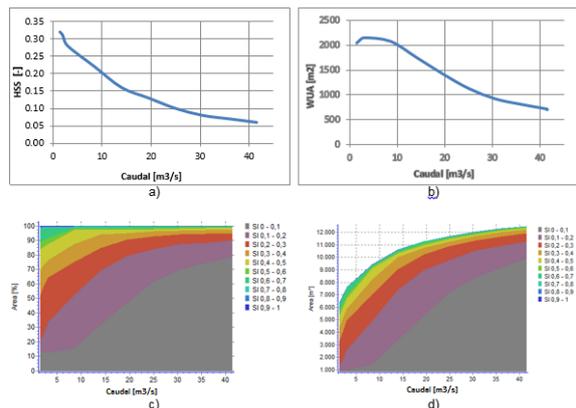


Figura 5. Resultados del cálculo de las áreas de desove de la trucha en CASiMiR. a) Variación del HSS con el caudal; b) Variación del WUA con el caudal; c) número de áreas con el mismo SI; d) proporción de las áreas con el mismo SI.

4. Conclusiones

La metodología para el análisis morfológico de ríos se ha desarrollado con la intención de que sea aplicable para todo tipo de morfologías, a fin de que sea un elemento orientador hacia las medidas que se deben tomar para alcanzar unas condiciones físicas cercanas a las naturales. Con estas medidas se garantiza que el aspecto hidromorfológico sea un soporte para el biológico a través de la creación y mejoramiento del hábitat. Puede ser útil en cualquier tipo de proyecto en el que se pretenda hacer una restauración para saber cuáles medidas se deben tomar para que el proyecto sea exitoso y autosostenible. Es además de gran aplicabilidad para proyectos hidroeléctricos, en los que se deben evaluar y predecir las condiciones ecológicas antes y después de la intervención. Con esta herramienta junto con los modelos hidráulicos y del hábitat se puede encontrar tanto un caudal óptimo para garantizar el buen estado ecológico o los impactos de las actividades de descarga de sedimentos.

Referencias

- Flores, A. N., Bledsoe, B. P., Cuhaciyán, C. O., & Wohl, E. E. (2006). "Channel-reach morphology dependence on energy, scale, and hydroclimatic processes with implications for prediction using geospatial data". *Water Resources Research*, 42, 1-15
- Montgomery, D. R., & Buffington, J. M. (2013). "Geomorphic Classification of Rivers". http://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2013_buffington_j001.pdf
- Schneider, M., Noack, M., Gebler, T., Ianina, K. (2010). "CASiMiR". http://www.casimir-software.de/data/CASiMiR_Fish_Handb_EN_2010_10.pdf
- Zapata, J., Noack, M., Wieprecht, S. (2015). "Guide for the river morphological restoration in Colombia: exemplary hydromorphological and habitat modeling". Stuttgart.

Longitud de reja de un sistema de captación de fondo

Rack length of a bottom intake system

(Recepción 02/01/2017; Aceptación 09/03/2017)

Haro, P.L.¹; García, J.T.²; Castillo, L.G.³

¹Universidad Politécnica de Cartagena. Estudiante de Doctorado

²Universidad Politécnica de Cartagena. Profesor Asociado

³Universidad Politécnica de Cartagena. Profesor Titular

Teléfono: +34 603 180 335

Email: patricia.haro@epn.edu.ec

Resumen. La longitud de reja es una variable de importancia en el diseño de un sistema de captación de fondo. El presente trabajo recoge diversas formulaciones para el dimensionamiento de rejillas de fondo en captaciones caucásicas o tirolesas. Los valores de longitud de reja para diversos caudales derivados se presentan en forma adimensional y para relaciones de área libre (espacio entre barrotes) sobre área total de 0.28 y 0.60. Dichas longitudes manifiestan importantes diferencias en función de las condiciones para las que fueron obtenidas en cuanto al tipo de barras -circulares o planas-, espaciado entre barras, o la pendiente adoptada por la reja.
Palabras clave. Condiciones de Diseño; Índice de huecos; Longitud de Reja, Captación de fondo

Abstract. The length of rack to derive a flow rate is an important variable in the design of bottom rack systems. The present work includes several formulations for the sizing of the bottom racks of a Caucasian or Tyrolean weir. Rack length values for different flow rates are presented in dimensionless form and for the ratio free area over total area of values 0.28 and 0.60. These lengths present important differences depending on the conditions for which they were obtained as, type of bars, e.g. circular or flat, spacing between the bars, or the slope adopted by the grid.

Keywords. Bottom Racks; Design Conditions; Void Ratio, Wetted Rack Length.

1. Introducción

Los ríos de montaña se caracterizan por tener pendientes longitudinales fuertes, lluvias intensas de corta duración, grandes variaciones de caudal y alto contenido de sedimento con escasos finos (agua limpia en época de estiaje), Krochin (1968).

Las zonas semiáridas, en cambio, se caracterizan por tener escasas precipitaciones y gran variabilidad espacio – temporal, baja humedad de los suelos, escasez de cubierta vegetal, morfología abrupta y con escorrentías con gran capacidad de transporte de sedimentos (García, 2016).

En las cuencas de ríos de montaña, se han utilizado captaciones tirolesas o caucásicas por su capacidad de captación derivando la mínima cantidad de sedimentos, lo que facilita su operación y mantenimiento cuando se ubican en lugares de difícil acceso (Krochin, 1978).

En las cuencas semiáridas se plantea la implementación de captaciones con reja de fondo en las partes altas para captar caudales de escorrentía en tiempo de lluvias. Sin embargo, la alta capacidad de arrastre de sedimentos en este tipo de cuencas precisa el estudio detallado de los parámetros de diseño a fin de optimizar el dimensionamiento de la estructura y garantizar la captación de caudales de avenida con elevada capacidad de transporte de sólidos (Castillo & Lima, 2010; García, 2016).

2. Consideraciones de Diseño

Las captaciones de fondo constan de una reja formada por barras paralelas dispuestas longitudinalmente a la corriente y ubicada con cierta inclinación, $tg\theta$, sobre una galería hecha en el cuerpo de un azud o en el fondo de un canal que facilita la derivación del caudal.

Una vez definido el caudal a captar, para el correcto diseño de la reja, se necesita considerar los factores que afectan su eficiencia como: la relación entre el área de huecos y el área total (índice de huecos), forma de las barras, pendiente de la reja (reduce la oclusión y facilita la autolimpieza), las condiciones de aproximación del flujo (número de Froude a la entrada) y la resistencia a la flexión de los perfiles (capacidad de resistir golpes o abrasión provocada por material grueso transportado por las avenidas).

El comportamiento de las rejillas de fondo ha sido estudiado por diversos investigadores como se menciona en el trabajo realizado por García (2016). El flujo sobre los sistemas de captación de fondo es tridimensional y espacialmente variado, presentando interacciones con las barras y un alto nivel de turbulencia. Como simplificación, para el ajuste de los diversos parámetros se suele adoptar las siguientes hipótesis:

- Distribución hidrostática de presiones a lo largo del flujo.
- Flujo unidimensional con caudal decreciente



- Aplicación de la Ecuación de Conservación de la Energía.
- Coeficientes de descarga ajustados experimentalmente.

En cuanto a la pérdida de energía, en algunos estudios se asume como hipótesis que es despreciable (línea de energía horizontal) mientras que en otros casos, se parte de la hipótesis de energía específica constante, asumiendo que el calado que se presenta al inicio de la reja corresponde al calado crítico.

3. Longitud de la Reja de Fondo

El presente trabajo recoge diversas formulaciones que proponen longitudes de reja necesarias para derivar un determinado caudal en un sistema de captación de fondo. Estas formulaciones proceden de trabajos experimentales en laboratorio y en prototipo recogidos en la bibliografía. Los resultados obtenidos de su aplicación se recogen en las Figuras 1 y 2 para los casos de índices de huecos $m = 0.28$ ($b_l = 0.0389$ m y $b_w = 0.10$ m) y 0.60 ($b_l = 0.15$ m y $b_w = 0.10$ m); barras planas con forma de T, prismáticas, circulares y prismáticas con coronación redondeada; y pendiente del 20%. En el caso del índice de huecos $m = 0.60$ los valores se pueden comparar con los medidos en prototipo para el caso de barras circulares y pendiente del 20% (Drobir, 1999).

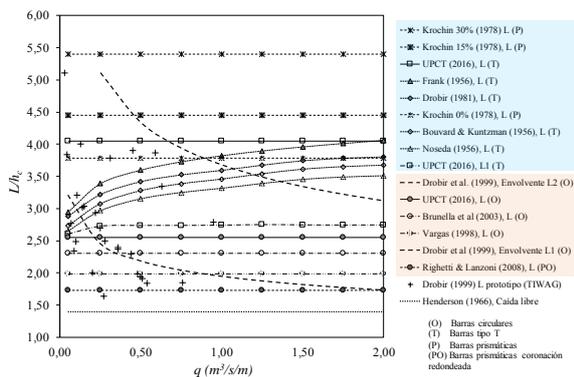


Figura 1. Relación Longitud de reja - calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.60$.

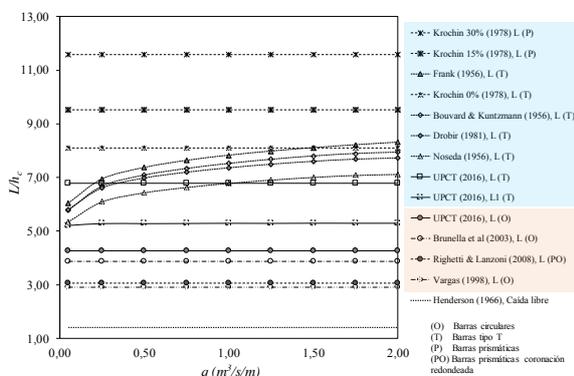


Figura 2. Relación Longitud de reja - calado crítico en función del caudal máximo de captación para $m = 0.28$.

En las figuras 1 y 2 se muestran diferentes longitudes: L es la longitud total de la reja para derivar un determinado caudal; L_1 representa la

longitud máxima que alcanza la lámina de agua entre dos barras; y L_2 es la envolvente de las longitudes medidas en prototipo para derivar la totalidad de un caudal, es decir una envolvente de L (Drobir, 1999).

En dichas figuras se distinguen las formas de las barras que fueron usadas para ajustar cada formulación, mientras que en el Anexo se pueden observar las características de los ensayos experimentales realizados.

De forma concreta, para el caso de $m = 0.60$ con barras de sección circular, los valores de longitud de reja adimensional (L/h_c) varían desde 1.70 hasta 2.60, quedando por encima la envolvente de Drobir (L_2) con el valor de 3.70, para el caso concreto de caudal específico $q = 1.00$ m³/s/m. Mientras, para las barras tipo T, los valores de longitud de reja adimensional varían desde 2.70 hasta 4.10 cuando no se considera obstrucción debida al transporte de sedimentos. Quedan en la parte superior los valores de longitud de reja de 4.40 y 5.40 que corresponden a rejas con porcentajes de obstrucción del 15% y del 30% respectivamente.

Si se observa el gráfico para $m = 0.28$ y se considera el mismo caudal específico de 1.00 m³/s/m, los valores de longitud de reja adimensional para barras circulares varían desde 2.90 hasta 4.30. Para el caso de barras tipo T, las longitudes de reja adimensionales varían desde 5.30 hasta 8.10 sin considerar obstrucción debida al transporte de sedimentos. Se presentan también los valores de longitud de reja considerando un porcentaje de obstrucción del 15% y del 30%, con valores adimensionales de 9.50 y 11.60, respectivamente.

Como se puede observar en las figuras, existen importantes diferencias en la longitud de reja propuesta por cada una de las formulaciones. Esto se debe a que cada uno de los trabajos experimentales se ha realizado con diferentes parámetros en lo que se refiere a índices de huecos, forma de las barras, pendiente de la reja o las condiciones de aproximación del flujo.

En definitiva, el presente trabajo complementa y actualiza el trabajo realizado por Castillo & Lima (2010), donde ya se recogía un gráfico con la bibliografía existente en cuanto a las longitudes de reja propuestas. A diferencia del anterior, en el presente trabajo, se recogen dichas longitudes adimensionales, se distingue el tipo de barra para las que fueron obtenidas, así como las características de cada uno de los trabajos experimentales (ver Anexo). Del mismo modo se actualiza con las nuevas formulaciones encontradas como es el caso de Vargas (1998) y García (2016).

4. Conclusiones

Presentar las longitudes para derivar un determinado caudal de forma adimensional se constituye en una herramienta de ayuda en el diseño de los sistemas de captación de fondo y que complementa a los trabajos anteriores (Castillo & Lima, 2010).



A la vista de los gráficos presentados se observa la importante influencia en la longitud de reja de parámetros como el índice de huecos y la forma de las barras seleccionadas. Así, en función del tipo de barras, circulares o planas, se encuentran diferencias de hasta el 35% en el caso del índice de huecos $m = 0.60$ y de hasta el 47% para $m = 0.28$.

La mayoría de formulaciones no consideran la obstrucción de las rejillas como consecuencia del depósito de sedimentos en el espacio entre los barrotes, salvo el caso de Krochin (1968) que propone coeficiente de obstrucción de hasta el 30%, que ha sido validado experimentalmente por Castillo et al. (2016).

Anexo

- Nosedá (1956)
 $q_{1max} = 100$ l/s; $B = 0.50$ m; $0.16 < m < 0.28$;
 Barras tipo T; Pendiente: 0 - 20%
 $L = 1.1848 \frac{H_0}{C_{qh}m}$; $C_{qh} = C_{qh}(h)$;
 $C_{qh}(h) = 0.66m^{-0.16} \left(\frac{h}{l}\right)^{-0.13}$
- Bouvard & Kuntzmann (1956) Información de Nosedá (1956)

$$L = \left\{ \frac{1}{2m'} \left[\left(j + \frac{1}{2j^2} \right) \arcsen \sqrt{\frac{j}{j + \frac{1}{2j^2}}} + 3 \sqrt{\frac{1}{2j}} \right] + \left(\frac{0.303}{m'^2} + \frac{2j^3 - 3j^2 + 1}{4j^2} \right) tg\theta \right\} h_1 \cos\theta$$

$$j = \frac{h_1}{h_c} = 1; \quad m' = C_{qo}m; \quad C_{qo} = 0.82$$
- Frank (1956). Información de Nosedá (1956)
 $L = 2.561 \frac{q_1}{\lambda \sqrt{h_0}}$; $\lambda = m C_{qh} \sqrt{2g \cos\theta}$;
 $C_{qh} = C_{qh}(h)_{Nosedá}$
- Krochin (1978). Información de Melik Nubarov (Danelia N.F., 1964) con barras prismáticas y planas

$$L = \left[\frac{0.313q_1}{(C_{qH}k_1)^2} \right]^{\frac{2}{3}}; \quad k_1 = (1-f)m;$$
 $C_{qH} = C_0 - 0.325 \tan\theta; \quad C_0 = 0.50$
- Drobir (1981). Información de Frank (1959) y Bouvard & Kuntzmann (1956)

$$L = \frac{0.846}{C_{qh}m^2(\theta)\sqrt{x}} \sqrt[3]{q_1^2}; \quad 2\cos\theta x^3 - 3x^2 + 1 = 0;$$
 $C_{qh} = C_{qh}(h)_{Nosedá}$

- Drobir et al. (1999)
 $q_{1max} = 20$ l/s; $B = 0.50$ m; $m = 0.60$; Barras circulares; Pendiente: 0 - 20%
 $L_1 = 0.9088q_1^{0.4993}$; $L_2 = 1.7205q_1^{0.4296}$;
 L_{TIWAG}

- Brunella et al. (2003)
 $q_{1max} = 100$ l/s; $B = 50$ cm; Barras circulares
 Dos tipos de ensayos: $m = 0.352$ y $m = 0.664$
 Pendiente: $0^\circ - 51^\circ$

$$L = \frac{0.83H_0}{C_{qo}m}; = 0.87$$
- Righetti y Lanzoni (2008)
 $q_{1max} = 37.5$ l/s; $B = 25$ cm; $m = 0.20$; $b_l = 0.50$ cm; $b_w = 2.0$ cm; Barras prismáticas con bordes redondeados; $b_o = 1.50$; $b_a = 0.478$

$$\Delta Q = C_{qo}mBL\sqrt{2gH_0} \left(\frac{aL}{2H_0} F_{Ho} + 1 \right) \{ \tanh[b_o(\sqrt{2} - F_{Ho})] \}^{b_a}$$

$$F_{Ho} = \frac{U_0}{\sqrt{gH_0}}; \quad a = -0.1056$$
- Vargas (1998)
 $q_{1max} = 40$ l/s; $B = 55.2$ cm; Barras circulares
 Pendiente: 0 - 20°; Dos tipos de ensayos: $m = 0.33$ y $m = 0.50$

$$L = k_2 \sqrt{\frac{2 \cos\theta q_1^2}{mgh_1}}; \quad k_2 = 1.10$$
- García (2016)
 $q_{1max} = 77.7$ l/s; $0.16 < m < 0.28$; $0.0057 < b_l < 0.0117$; Barras tipo T; Pendiente: 0 - 33%

$$L \approx 1.3 \frac{h_c}{C_{qo}m} (1 + 0.3tg\theta); \quad C_{qo} = a \cdot e^{-0.77m}$$

$$a = 1.43 \text{ (circular)}; \quad a = 0.90 \text{ (tipo T)}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{2mC_{qH}\sqrt{(H_0 + x \sen\theta)(H_0 + x \sen\theta - h \cos\theta)} + h \sen\theta}{3h \cos\theta - 2(H_0 + x \sen\theta)};$$

$$C_{qH} \approx \frac{0.58e^{-0.75(\frac{x}{h_c}m)}}{(1 + 0.90tg\theta)}$$
- Henderson (1966)
 Caída Libre: $L = 1.40h_c$

Nota: Se considera que al inicio de la reja el calado h_1 es igual al calado crítico h_c ; el calado al final de la reja h_2 es igual a cero; la energía específica al inicio de la reja $H_0 = H_{min}$; B es el ancho del canal; q_1 es el caudal específico de captación, θ es el ángulo de inclinación de la rejilla; b_l es el espacio entre barras y b_w es el ancho de la barra; l es el valor del intereje ($b_l + b_w$); F_{Ho} es el número de Froude al inicio de la reja; C_{qh} , C_{qH} , C_{qo} son los coeficientes de descarga de la reja en función del calado, la altura de energía y estático respectivamente, a , b_o , b_a , k_2 son coeficientes propios de las ecuaciones en que intervienen, así como f es el factor de obstrucción (%).

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero de la Fundación Séneca de la Región de Murcia – España



para el proyecto “Optimización de los sistemas de captación de fondo para zonas semiáridas y caudales con alto contenido de sedimentos. Definición de los parámetros de diseño”. Referencia 19490/PI/14.

Referencias

Castillo, L. G., & Lima, P. (2010). Análisis del Dimensionamiento de la Longitud de Reja en una Captación de Fondo. IAHR (Ed.), IAHR XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Punta del Este.

Drobir, H., Kienberger, V., & Krouzecky, N. (1999). The wetted rack length of the Tyrolean weir. In IAHR-28th Congress. Graz.

García, J. T. (2016). Estudio experimental y numérico de los sistemas de captación de fondo. PhD Thesis. Universidad Politécnica de Cartagena.

Krochin, S. (1978). Diseño Hidráulico. (E. Universitaria, Ed.) (Segunda). Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Vargas, O. A. (1998). Tomas de Fondo. In IAHR (Ed.), IAHR XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Oaxaca.

El uso de GLUE como algoritmo de aproximación al frente de Pareto: Aplicación al modelo hidrológico de Thomas (abcd)

The use of GLUE as an approximation algorithm for the Pareto front: Application to the abcd hydrological model of Thomas

(Recepción 28/12/2016; Aceptación 09/03/2017)

Duque Gardeazábal N.^{1,2}; Vega Viviescas C.¹; Obregón Neira N.¹

¹Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH)

Departamento de ingeniería civil y agrícola, Universidad Nacional de Colombia-Bogotá, Colombia

²Miembro de la IAHR Bogotá Young Professional Network

Teléfono: +57 1 3165000 ext 13406

Email: nduqueg@unal.edu.co

Resumen. *Diversos problemas hidrológicos requieren la calibración del modelo a partir de datos observados. En muchos casos, los modelos deben cumplir múltiples objetivos de calibración, encontrando un conjunto aceptable de soluciones, denominada Frente de Pareto. Este artículo presenta la identificación del frente, para el modelo abcd de Thomas, en el río Combeima (Colombia), aplicando el método de calibración Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) con tres funciones objetivo (FO). Se encontró que al calibrar con diferentes FO el conjunto de parámetros fue diferente y con un rango amplio. Además se observó que su influencia sobre la escorrentía simulada no fue sustancial.*

Palabras clave. *Calibración multiobjetivo; Frente de Pareto; GLUE; Modelo de Thomas.*

Abstract. *Several hydrological problems require to calibrate a hydrological model from the observed data. In many cases, models must include several metrics, finding an acceptable set of solutions called the Pareto Front. This paper presents the Pareto Front identification for the abcd Thomas model, applying the GLUE calibration method with three objective functions (FO) in the Combeima river (Colombia). It was found that the calibration results with different FO were different and its range were ample. Moreover, the influence in the simulated runoff was not significant.*

Keywords. *GLUE. Multiobjective calibration. Pareto front. Thomas model.*

1. Introducción

En hidrología, los modelos matemáticos sirven para comprender los procesos hidrológicos, e intentar predecir escenarios futuros dentro de los que se incluyen la predicción y el pronóstico (Dawson, Abrahart, & See, 2007; Silberstein, 2006). Sin embargo, no siempre se conocen los parámetros (ya que estos no necesariamente están asociados con mediciones que se puedan hacer en campo), por lo que deben obtenerse a partir de una muestra de datos observados de entrada y salida, solucionando el problema inverso.

Este problema inverso, es un proceso iterativo que tiene como objeto mejorar los resultados de la simulación a través de la variación de los parámetros del modelo. Los resultados son comparados mediante el cálculo de métricas, denominadas funciones objetivo (FO) que indican de forma cuantitativa la habilidad del modelo para reproducir ciertos fenómenos hidrológicos (Dawson et al., 2007). Sin embargo, se ha resaltado por varios autores que el enfoque de encontrar un único y mejor conjunto de parámetros es erróneo (Beven & Binley, 1992; Gupta, Sorooshian, & Yapo, 1998), debido a que tanto la estructura del modelo como las mediciones utilizadas para calibrarlo tienen errores.

Cada función objetivo tiene características propias, las cuales priorizan cierto conjunto de parámetros óptimos que no necesariamente son los mismos para

otra función objetivo. En muchos casos, los modelos deben satisfacer objetivos de desempeño que pueden ser contradictorios, por esta razón, se plantea la calibración de modelos de forma multiobjetiva.

Comparado con las soluciones monoobjetivo (SO, por sus siglas en Inglés), la calibración multiobjetivo (MO) generalmente no tiene una única solución, sino un conjunto aceptable de soluciones (Ngatchou, Zarei, & El-Sharkawi, 2005). Este conjunto de soluciones se denomina el frente de Pareto.

Aquí se presentan algunos tipos de algoritmos para la solución de problemas MO y por tanto, cómo hacen la identificación del frente. Además, se muestra un caso de estudio en la cuenca del río Combeima en Colombia, aplicando el método de calibración GLUE al modelo abcd de Thomas, para identificar el frente de Pareto con tres FO.

2. Problema inverso multiobjetivo

2.1. Frente de Pareto

El frente es un conjunto de soluciones del problema inverso que relaciona dos o más FO. Se dice que un conjunto de parámetros S pertenece al frente cuando no existe otra solución R tal que mejore un objetivo sin empeorar al menos uno de los otros definidos previamente, en lo que se conoce como un vector de parámetros no dominado.

El criterio de dominancia, permite la selección de soluciones o combinaciones de parámetros que



pertenecen al frente. Este criterio compara dos vectores de parámetros que posiblemente corresponden al frente.

El vector \vec{u} domina a \vec{v} si al menos una de las FO evaluadas $f(\vec{u})$ es mejor para \vec{u} . En consecuencia, aquellos vectores que no son dominados por ningún otro son los que pertenecen al frente de Pareto.

La optimización que ofrece el frente, reduce la incertidumbre por la selección subjetiva de las FO y brinda resultados óptimos desde un punto de vista “global” (Ngatchou et al., 2005).

2.2. Algoritmos de calibración

Muchas metodologías se han propuesto para calibrar modelos de forma SO, y algunas han sido adaptadas para la calibración MO. Así, el problema inverso MO, se puede clasificar en métodos clásicos y técnicas inteligentes diseñadas para encontrar el conjunto de posibles y aceptables soluciones conocidas como el frente de Pareto (Ngatchou et al., 2005).

Los métodos clásicos buscan convertir el problema MO en una sola función objetivo a través de diversos procedimientos. El más común de ellos es la ponderación de las funciones, que consiste en crear una nueva función con pesos que son aplicados a cada una de las funciones del vector objetivo (Ngatchou et al., 2005). Estos métodos de evaluación pueden ser usados con técnicas de calibración SO como el método SIMPLEX, búsqueda por incrementos, métodos de gradiente, etc. así como por métodos estocásticos como GLUE (Beven & Binley, 1992) y métodos de metaheurísticas basados en poblaciones. Sin embargo, la transformación a una forma SO tiene dos problemas: están orientados a encontrar un único conjunto que solucione el problema inverso; y mediante la variación de la transformación, solamente pueden identificar frentes localmente dominantes pero no globalmente. Cabe resaltar que estos métodos no tienen en cuenta el concepto de dominancia para la identificación del frente.

Por otra parte, las técnicas inteligentes se enfocan en optimizar simultáneamente cada una de las funciones individuales. Para hacer la calibración simultánea, estos métodos se basan principalmente en poblaciones, debido a que pueden evaluar varios posibles conjuntos de parámetros que tienen posibilidad de pertenecer al frente de Pareto (Ngatchou et al., 2005). La identificación del frente se hace mediante la evaluación de las FO en cada uno de los individuos pertenecientes a la población y al uso del criterio de dominancia que permite la selección de los mejores individuos. Sin embargo, estos algoritmos son complejos de programar y requieren datos adicionales como la cantidad de individuos, así como parámetros asociados al apareamiento entre ellos y el número de generaciones.

Evitando la complejidad de un algoritmo genético pero manteniendo el mismo esquema de poblaciones, una forma sencilla que permite encontrar el frente es

crear una población que pueda ser analizada para identificar los individuos que no son dominados por ningún otro, y que en consecuencia son parte del frente de Pareto. Esto se hace con un muestreo del espacio parametral mediante búsqueda por incrementos o a través de simulaciones de Monte Carlo (GLUE). Este procedimiento puede ser costoso computacionalmente, debido a la cantidad de individuos que requiere la población.

3. Caso de estudio

El presente ejercicio se realizó sobre la cuenca alta del río Combeima (Tolima, Colombia) con un área aproximada de 132 km². Se utilizaron los registros de estaciones meteorológicas e hidrológicas del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia) para: 4 estaciones de lluvia, registros de temperatura media, mínima y máxima, y registros de caudal afluente en la estación San Vicente del Combeima (LM-21217220) definida como cierre de la cuenca.

4. Metodología

Primero se realiza un pretratamiento de los datos meteorológicos. Para representar la hidrología de la zona de estudio, se escogió el modelo abcd, que es un modelo hidrológico de tipo agregado y que corre en formato mensual. Descrito por Thomas en 1981, permite determinar mediante 4 parámetros el caudal promedio mensual afluente de una cuenca. Este realiza un balance de masas en el suelo representado por dos zonas (Al-Lafta, Al-Tawash, & Al-Baldawi, 2013), la primera donde se dan los almacenamientos superficiales y la zona saturada donde hay un almacenamiento permanente. Al estar basado únicamente en balance de masa y tener una parametrización enfocada en la disponibilidad del agua para evaporación y recarga, se acepta que el modelo pueda ser aplicado a cualquier tipo de cuenca alta, media o baja.

Basados en experimentos piloto, se utiliza el muestreo aleatorio de los parámetros a, b, c y d del modelo en intervalos cercanos a los puntos que generan los menores valores de una función objetivo (RMSE). Posteriormente se define un periodo de calentamiento del modelo de 36 meses para asegurar que el valor de las condiciones iniciales no tenga influencia sobre la evaluación de las FO definidas (se definen para la evaluación las funciones RMSE, MAE y el 1-NSE (se hace la inversión del NSE para garantizar un problema de minimización), (Dawson et al., 2007). Con lo anterior, se procede a realizar 10 millones de simulaciones de Monte Carlo (GLUE) para generar la población, y así, evitar algoritmos menos eficientes o más complejos.

Por último se aplica el criterio de dominancia a los individuos de la población muestreada, para identificar los puntos que corresponden al frente de Pareto. Este es un proceso iterativo que puede optimizarse descartando aquellos puntos que son dominados por un punto en particular.

5. Resultados

Puede verse en la Fig. 1 que efectivamente no existe un conjunto único de parámetros que minimice las FO evaluadas en dicha figura. Sin embargo, cuando se evaluaron el RMSE y 1-NSE (Fig. 2) se observó que un mismo conjunto de parámetros minimiza ambas funciones. Esto puede deberse a que ambas dependen en gran medida de la sumatoria del cuadrado de los errores. Es claro además que la función MAE tiene un comportamiento diferente de las otras dos, lo cual genera que no exista un único conjunto óptimo de parámetros.

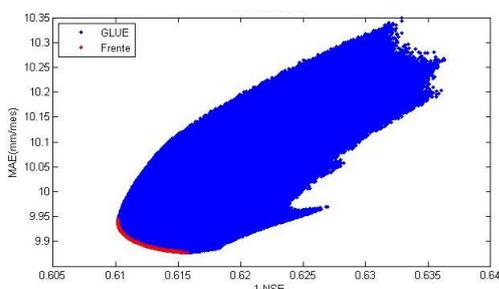


Figura 1. MAE vs 1-NSE de las simulaciones con GLUE y en rojo se resaltan las simulaciones que pertenecen al frente de Pareto.

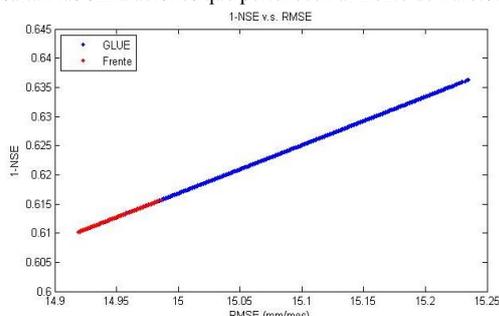


Figura 2. 1-NSE vs RMSE de las simulaciones con GLUE y en rojo se resaltan las simulaciones que pertenecen al frente de Pareto

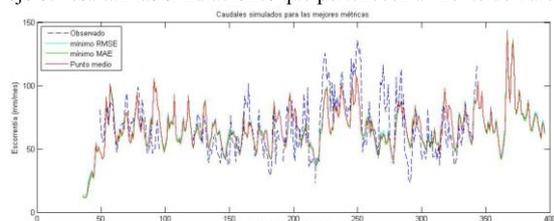


Figura 3. Hidrograma de escorrentía mensual con valores observados, con menor RMSE y MAE, y con un punto del frente.

La Tabla 1 muestra el valor mínimo y máximo para cada uno de los parámetros del modelo de Thomas, donde se puede ver que existe una gran rango para varios de los parámetros que pertenecen al conjunto de soluciones que son parte del frente de Pareto.

Tabla 1. Valores mínimos y máximos de los parámetros.

	mín.	máx.
a	0.9404	0.95
b	610	729.57
c	0.6114	0.6577
d	0.078	0.0999

La hidrógrafa de escorrentía mensual (figura 3) evidencia pocas diferencias en cuanto a picos y tiempo de ocurrencia de los mismos cuando se escogen diferentes conjuntos de parámetros dentro del frente.

6. Conclusiones y comentarios

El proceso de identificación de los individuos que pertenecen al frente está basado en la comparación de las FO, y el tiempo que esto requiere es proporcional al tamaño de la población muestreada. Por tanto, puede optimizarse el proceso mediante el descarte de aquellos conjuntos de parámetros que son dominados por otro conjunto en particular, que esté siendo comparado con todos los demás.

La poca influencia sobre la escorrentía que se presenta con la variación de los parámetros dentro del frente, puede deberse principalmente a la estructura del modelo. Posiblemente otros modelos sean realmente sensibles a los cambios de los parámetros, incluso dentro de los conjuntos que conforman el frente de Pareto.

Otra temática de gran importancia, es la comparación de diversas variables hidrológicas simuladas y observadas (caudal, humedad del suelo, etc.) que sirven para estimar los parámetros del modelo en la calibración MO.

Como trabajo futuro se plantea, el análisis de sensibilidad y de incertidumbre, así como realizar la identificación del frente a partir de algoritmos genéticos.

Agradecimientos

Al profesor Sergio Salazar por sus comentarios y apoyo, al profesor Nelson Obregón por su guía, y a los compañeros de la IAHR-YPN Bogotá y del GIREH.

Referencias

Al-Lafta, H. S., Al-Tawash, B. S., & Al-Baldawi, B. A. (2013). Applying the “abcd” Monthly Water Balance Model for Some Regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications*, 25(Figure 1), 36–48.

Beven, K., & Binley, A. (1992). The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(May 1991), 279–298.

Dawson, C. W., Abrahart, R. J., & See, L. M. (2007). HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, 22(7), 1034–1052.

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751–763.

Ngatchou, P., Zarei, a., & El-Sharkawi, a. (2005). Pareto Multi Objective Optimization. *Proceedings of the 13th International Conference On Intelligent Systems Application to Power Systems*, 84–91.

Silberstein, R. P. (2006). Hydrological models are so good, do we still need data? *Environmental Modelling and Software*, 21(9), 1340–1352.



Análisis del transporte de solutos en medios porosos utilizando procesamiento de imágenes de un modelo físico 2D (sand box)

Analysis of the transport of solutes through a porous medium using image-processing of a 2D physical model (sand box)

(Recepción 29/12/2016; Aceptación 10/03/2017)

Bayuelo Sierra, A.J.¹; Lora Ariza, B.J.²; Lora Castro, B.J.³; Castro Alcalá, E.⁴; Donado Garzón, L.D.⁵

¹Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 LEH (408-207) Bogotá

²Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 LEH (408-207) Bogotá

³Universidad del Atlántico, Km 7 vía al Puerto Colombia. Bloque C of 601 Barranquilla

⁴Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 LEH (408-207) Bogotá

⁵Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 Lab Hidráulica (409-310) Bogotá

Teléfono: +57 3016415677

Email: ajbayuelos@unal.edu.co

Resumen. Conservar la calidad y cantidad del agua subterránea es una de las principales metas de la hidrogeología. Para ello resulta útil conocer el comportamiento de los contaminantes entendidos como solutos a través de los medios porosos. Existen varias metodologías para analizar el comportamiento hidrodinámico de estos, ejemplo de ello son los modelos físicos bidimensionales conocidos como Sand Boxes. En el presente artículo se presenta una propuesta para realizar el procesamiento de imágenes, entendido como el mejoramiento digital de las mismas, obtenidas durante el proceso de transporte de solutos utilizando sand boxes, para minimizar el ruido ocasionado por el brillo, la forma del lente de la cámara, el movimiento en el modelo, entre otros.

Palabras clave. Sand Box, Transporte de solutos, mejoramiento de imágenes.

Abstract. Preserving the quality and quantity of groundwater is one of the main goals of the hydrogeology. To this end, it is useful to gain a greater understanding on the behavior of contaminants, viewed as solutes through the porous media. There are several methods for studying the hydro-dynamic behavior of the solutes, for instance the two-dimensional physical models known as Sand Boxes. This paper provides a proposal to enhance images, meaning the digital process of improvement, obtained during the sand boxes tracer test which describes transport processes, in order to reduce the noise produced by the brightness effects, the kind of the camera lens, the movements in the model, etc.

Keywords. Sand Box, Transport of solutes, image enhancement.

1. Introducción

El agua subterránea representa, aproximadamente el 98% del agua dulce no congelada del planeta, y su uso ha ido en aumento en las últimas décadas, principalmente por la contaminación en las fuentes hídricas superficiales, su presencia generalizada, su buena calidad, y por los avances en cuanto al conocimiento de los procesos hidrogeológicos (UNESCO 2016). Por ello, se requiere aumentar el conocimiento de los procesos hidrogeológicos y de transporte de contaminantes en medios porosos, fracturados y cársticos para garantizar la calidad de este recurso (Villholth & Giordano, 2007).

Determinar la concentración espacio temporal de un contaminante, es el principal reto de la modelación física y numérica de los procesos de transporte (Sanchez Triana, 1995). Los sand boxes (caja de arena) son modelos físicos bidimensionales ampliamente utilizados en la hidrogeología para el estudio de los procesos de transporte de contaminantes. Estas cajas son fabricadas por lo general en acrílico para permitir la visualización del flujo de contaminantes a través de un medio poroso (Illman et al, 2010).

El análisis de las concentraciones puede realizarse mediante la adquisición de imágenes, relacionando la intensidad de los píxeles con la concentración del contaminante. Sin embargo, este enfoque representa retos adicionales: En la adquisición, debido al ángulo de incidencia de la luz, el color de los granos, la forma de los lentes de la cámara, los desplazamientos del sistema (Castro Alcalá et al, 2012); En el procesamiento: El establecimiento de la relación espacio temporal, la apropiada segmentación del trazador, la determinación de los niveles de concentración, etc. Todo lo anterior introduce ruido en las imágenes a trabajar. En este artículo se presenta una metodología para abordar los problemas anteriormente señalados, disminuyendo el ruido y maximizando la fidelidad de la información adquirida con el fenómeno estudiado.

2. Procedimiento experimental

La fase de experimentación fue realizada en un modelo físico bidimensional conocido como sand box, el cual consiste en una caja fabricada en acrílico transparente 70 cm x 45cm x 4 cm (largo x alto x ancho) y espesor de paredes de 0.8 cm llenada con arena, en la cual es posible representar los procesos



de flujo y transporte de solutos mediante un ensayo de trazador (Botero-Acosta & Donado, 2015).

El sand box cuenta con 30 pozos transversales (4 mm de diámetro) que sirven para inyectar el contaminante (solute) a transportar, tomar muestras y medir las concentraciones, así como dos tubos de PVC ranurados en sendos extremos del modelo los cuales permiten simular una condición de flujo regional con un gradiente hidráulico bajo, tal y como se aprecia en la Fig. 1. Este modelo, representa un acuífero heterogéneo llenado con arena #30 (gruesa 0,6 mm, elevada permeabilidad: 225 m/día) y con un lente central de arena #60 (fina 0.3 mm, de baja permeabilidad: 16 m/día).

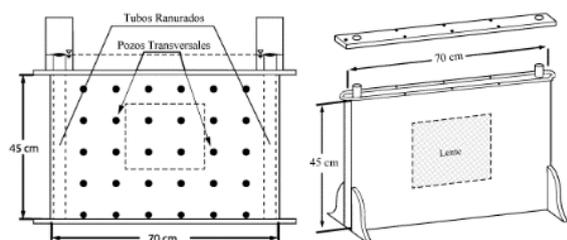


Figura 1. Esquema del Sand box empleado.

2.1. Ensayo de Trazadores

Para este ensayo, agua potable se introdujo mediante una bomba peristáltica por un extremo del sand box con un caudal de 300 ml/min. Un gradiente hidráulico constante de 0.1 (7 cm en vertical por cada 70 cm en horizontal) es creado entre el reservorio de abastecimiento y la salida del modelo logrando condiciones de flujo constante. Luego de esto, se inyectó una solución salina con Eosina Amarillenta tipo Y (trazador conservativo) con una concentración de 1.023 mg/L durante el experimento. Finalmente se extrajeron muestras del fluido cada 60 segundos para medir su concentración y obtener las curvas de llegada (BTC por sus siglas en inglés Breakthrough curves).

2.2. Adquisición de imágenes

El sand box fue ubicado en una cabina relativamente oscura, iluminada únicamente con luz halógena. Usando una cámara digital Sony HandyCam HDRCX625B en modo HD y una lente angular (lente G, distancia focal 35 mm, diámetro del filtro 46 mm) se obtuvo imágenes del ensayo de trazadores. La resolución de esta cámara es de 4912 x 3264 píxeles (16 Megapíxeles) en el espacio de color RGB. De cada imagen se segmenta un rectángulo de 3500 x 2300 píxeles (8 Megapíxeles) donde ocurre el fenómeno de transporte. Las imágenes fueron tomadas cada 60 segundos, es decir, al mismo tiempo que fueron extraídas las muestras del fluido para así realizar la correlación entre color de píxel y concentración. Cabe resaltar que la cámara se ubicó a 2.5 m del modelo físico estudiado.

2.3. Procesamiento de imágenes

El espacio de color RGB representa todos los posibles colores que pueden ser formados por la terna de canales rojo, verde y azul, la mayoría de los dispositivos de visualización (display systems) usan este espacio (Nishad & Manicka, 2013). Por su parte, el espacio de color HSV separa el valor de Brillo [V] del resto de la información de color (cromaticidad), esto es, del matiz [H] y de la Saturación [S]. (Sural et al, 2002).

La variación heterogénea del brillo en la imagen dificulta la segmentación del trazador y los diferentes tipos de fondo, por lo tanto es considerada como ruido. Para homogeneizar el brillo se hizo una transformación del espacio de color a HSV, donde el canal del brillo está separado, mediante las relaciones propuestas por Wen et al. (2013). En este espacio de color se determinó y asignó la cantidad de brillo a todos los píxeles de la imagen en 110 (cantidad adimensional en una escala de 0 a 255). Finalmente se regresó al espacio de color RGB. Los resultados de este procedimiento se pueden apreciar en la Fig. 2.

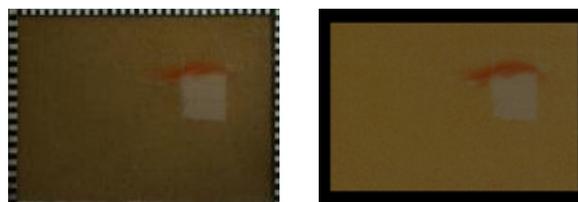


Figura 2. Homogeneización de valor del brillo.

Con el fin de correlacionar la información puntual de color de cada canal con las mediciones reales de concentración del contaminante, se realizaron ensayos de trazadores, así, diferentes curvas de llegada (BTC) fueron obtenidas. Se encontraron diferencias significativas entre las señales de cada uno de los canales de color. Las señales de los canales verde y azul resultaron estar mucho mejor correlacionadas con la concentración que las del rojo, el cual presenta la mayor cantidad de ruido de los tres canales (ver Fig. 3). Basados en esto y considerando la naturaleza amarillenta del trazador, se seleccionó el verde como el canal de trabajo.

2.4. Relación entre la cantidad de color y concentración del soluto

Con el fin de corroborar que la cantidad de color permite describir el comportamiento de la concentración de un soluto (contaminante), se midió tanto la conductividad eléctrica (función de la concentración de solutos en el agua), como la cantidad de color verde en el mismo punto (Fig. 4). La relación entre la cantidad de color verde y la concentración de soluto fue obtenida utilizando la relación 1:

$$I(x) = \frac{I_{max}(x) * C(x)}{C_{max}(x)} \quad (1)$$



Figura 3. Señales puntuales de los canales de color (RGB) en función del tiempo, a las imágenes se le aplicó un filtro mediana con vecindad de 7x7.

donde $I(x)$ es la intensidad del color verde en la ubicación x , e $I_{max}(x)$ es el valor más elevado de intensidad de color en el mismo punto.

La concentración de la solución salina con Eosina es representada por $C(x)$, mientras que $C_{max}(x)$ es el valor más elevado de concentración en el punto x .

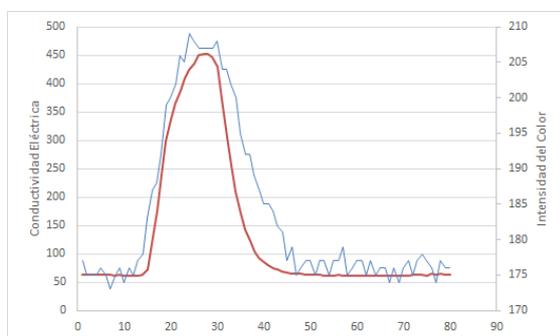


Figura 4. Correlación entre intensidad de color y conductividad eléctrica.

2.5. Eliminación del ruido producido por la diferencia de colores en los granos

El medio poroso utilizado está caracterizado por dos tipos de arenas de diferentes granulometrías previamente tamizadas y lavadas con agua desionizada para evitar alteraciones en las mediciones de la concentración mediante la técnica de conductimetría. Durante el proceso de llenado (packing), se intentó que los granos de las arenas empleadas tuviesen el mismo color, sin embargo esto no fue posible dada la naturaleza heterogénea de la cantera de donde fue extraído el material. A pesar de que la mayoría de los granos son de color amarillento, existen otros más oscuros que introducen ruido. Por ello, se generaron nuevas imágenes, a partir de las originales, en las cuales se aplicó un filtro mediana con una vecindad de 31 x 31 píxeles. Como resultado de dicho filtro, cada píxel fue reemplazado con el promedio de color, por canal, de la vecindad. Esta vecindad fue determinada luego de probar con varios tamaños y concluir que ésta optimiza la reducción del ruido, con la menor pérdida de información posible, variables que son contrarias en el procesamiento de imágenes.

3. Resultados

Luego de aplicar la técnica de reducción del ruido, descrita anteriormente, se presenta la secuencia del procesamiento donde se evidencia la mejora sustancial de las imágenes para realizar el análisis del transporte de solutos utilizando modelación física (ver Fig. 5).

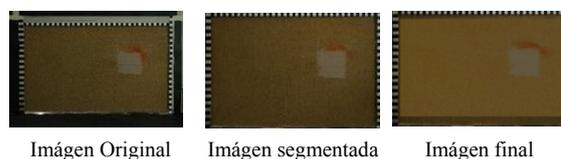


Figura 5. Secuencia de procesamiento de imágenes.

Se observó que reducir las imágenes empleando vecindades superiores a 40 x 40 píxeles, disminuye significativamente el ruido producido por heterogeneidades en las características físicas de los granos del medio, sin embargo esto conlleva a una pérdida de información. Se determinó que una vecindad de 31 x 31 píxeles permite reducir significativamente el ruido y brinda información relevante para el análisis del transporte de solutos a través de un medio poroso, por cuanto las BTC encontradas utilizando el método de conductimetría tienen una alta correlación con las obtenidas al analizar el color de los píxeles en cada imagen.

4. Conclusiones

El método propuesto es apropiado para mejorar las imágenes y lograr resultados que permitan analizar adecuadamente las propiedades de transporte de solutos. Esta técnica resulta valiosa cuando se desea estudiar procesos de transporte mediante modelación física y las imágenes a trabajar presentan ruidos producidos por factores externos. Además este método es adecuado cuando el modelo físico es llenado utilizando arena heterogénea en color.

Para el mejoramiento de las imágenes, el método nos muestra que los tamaños de vecindad óptimos, en imágenes de 8 Megapíxeles, son aquellos mayores de 11x11 píxeles y menores de 51x51 píxeles, sugiriendo uno de 31x31 píxeles (en imágenes de menor resolución estos valores pueden generar pérdida de información). El canal rojo en el espacio

de color RGB genera mucho ruido, por lo tanto no se recomienda utilizarlo como un indicador de concentración de soluto a través de los medios porosos en la modelación física al utilizar el trazador Eosina Amarillenta tipo Y.

Referencias

- Botero-Acosta, A., Donado, L. (2015). “Simulación a escala de laboratorio de barreras hidráulicas contra la intrusión salina en acíferos costeros confinados considerando los efectos de la estratificación del medio.” Maestría thesis. Universidad Nacional de Colombia. Bogota.
- Castro Alcalá, E., Fernandez Garcia, D., Carrera, J., Bolster, D. (2012). “Visualization of Mixing Processes in a Heterogeneous Sand Box Aquifer.” *Environmental science and technology*, 46, pp. 3228-3235. DOI:10.1021/es201779p
- Illman, W., Zhu, J., Craig, A., Yin, D. (2010). “Comparison of aquifer characterization approaches through steady state groundwater model validation: A controlled laboratory sandbox study.” *Water Resources Research*, 46. doi:10.1029/2009WR007745
- Nishad, P. M., Manicka, R. (2013). “various colour spaces and colour space conversion algorithms.” *Journal of Global Research in Computer Science*, 4, pp. 44-49.
- Oliviera, I. B., Demond, A. H., Salehzadeh, A. (1996). “Packing of sand for the production of homogeneous porous media.” *Soil science Society*, 60 pp. 49-53.
- Sanchez Triana, E. (1995). “Licencias ambientales: Evaluación del impacto ambiental: instrumento de planificación.” Tercer mundo editores. Bogotá, Colombia.
- Sural, S., Qian, G., Pramanik, S. (2002). “segmentation and histogram generation using the hsv color space for image retrieval.” *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing*, pp. 589-592.
- UNESCO. (s.f.). “El agua subterránea en un medio ambiente cambiante.” (UNESCO) Recuperado el 2016, de Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe: <http://www.unesco.org/new/es/office-in-montevideo/ciencias-naturales/water-international-hydrological-programme/aguas-subterraneas/>
- Villholth, K. G., Giordano, M. (2007). “The agricultural groundwater revolution: Opportunities and threats to development.” CAB international. Sunil Mawatha, Pelawatte, Sri Lanka
- Wen, L., Xu, C., Tao, L., & Zheng, T. (2013). “Implementation of RGB to HSV Color Space Conversion with Xilinx”. A. Ghanbari, Ed. *Advanced Materials Research*, pp. 527-534. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.816-817.527

Disipación de energía en cuencos con pendiente adversa

Reverse Slope Energy Dissipators

(Recepción 04/01/2017; Aceptación 15/03/2017)

Plua, F.¹; Hidalgo, X.²

¹IAHR Member 49371, Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito-Ecuador

² Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental, Quito-Ecuador

Teléfono: 59323803977-593984967929

Email: frank.plua@epn.edu.ec

Resumen. Este trabajo corresponde al estudio de disipadores de energía con forma de trampolín liso y desarrollo en contrapendiente. Se definieron las características principales del fenómeno en la geometría original. Se efectuaron modificaciones a la estructura y se ubicaron dispositivos en diferentes posiciones y grados de inclinación para mejorar el funcionamiento. Con base en los resultados de las pruebas se definió la configuración óptima que consiste en la reducción a la mitad del ancho inicial de la rápida y la colocación de dos rejillas disipadoras. Esta nueva disposición permitió optimizar el caudal específico en 3.7 veces respecto al manejo en la configuración original.

Palabras clave. Disipador en contrapendiente; Disipador tipo trampolín liso; Rápidas; Rejillas Disipadora; Resalto hidráulico.

Abstract. This study focuses on buckets and adverse slope energy dissipators, using a series of tests to determine the main characteristics of the phenomenon on a modified prototype. By altering this structure and placing devices in different positions and degrees of tilt to improve its performance, these tests revealed an optimal configuration, which consisted of a width reduction channel in half, and the placement of the two grids. This arrangement allows the proper operation of a discharge per unit width equivalent to 3.7 times the maximum discharge per unit width of the original prototype.

Keywords. Reverse Slope Energy Dissipator; Buckets energy dissipators; Steeped Channel; Dissipator Grids; Hydraulic Jump

1. Introducción

El disipador de energía con forma de trampolín liso más pendiente adversa no ha sido estudiado en el pasado debido al buen funcionamiento individual de los trampolines sumergidos y a que el fenómeno del resalto en pendiente adversa no ha sido suficientemente analizado (McCorquodale, 1994). El objetivo de esta investigación es conocer y optimizar este tipo de estructura a través de experimentos realizados en laboratorio, con el fin de plantear una nueva alternativa de disipación de energía.

2. Metodología

2.1. Descripción del prototipo

Para realizar el análisis se utilizó el Modelo Hidráulico de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada El Batán realizado por la Escuela Politécnica Nacional en convenio con la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS (antes EMAAPQ) en el año 2000 (EPN, 2000). En la Fig. 1 se encuentra una vista lateral del modelo físico. La estructura de entrada al modelo es una compuerta plana vertical de alta carga ubicada en la abscisa -0.417 m. La compuerta vertical es de madera triplex y tiene un ancho b de 40cm, esta estructura regula el caudal que ingresa al modelo a través de sus aperturas. Entre las abscisas -0.188 m y 2.554 m se ubica un canal de entrada de $b = 40$ cm,

altura de pared $h = 15$ cm y pendiente longitudinal de 10.96%.

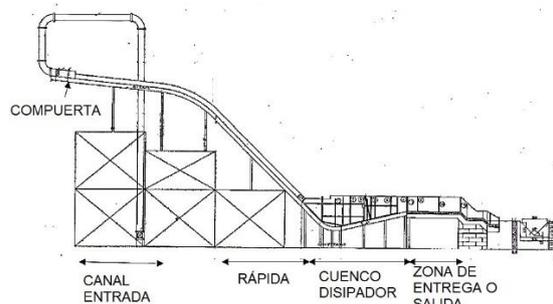


Figura 1. Esquema del prototipo.

El sistema de investigación o prototipo comprende la Rápida, el Cuenco Disipador-que es la estructura hidráulica objeto de investigación- y la Zona de Entrega o Salida. La rápida tiene las mismas condiciones de fondo que el canal, se encuentra entre las abscisas 4.255 m y 6.973 m, entre las cotas 4.18 m y 1.46 m, es de sección rectangular con base y altura iguales al canal de entrada y posee una pendiente longitudinal del 100%. El Cuenco Disipador corresponde a una cámara de disipación con forma de trampolín liso más desarrollo en contrapendiente del 25% y se ubica entre las abscisas 6.973 m (cota 1.46 m) y 10.297 m (cota 1.18 m). Está conformado por planchas de acrílico para la pared y madera triplex tratada para la base tal como en la rápida y el canal.

Finalmente, la zona de entrega o salida lleva el flujo hasta el tanque recolector, es de sección rectangular

con una longitud de 2 m y se extiende desde la abscisa 10.297 m (cota 1.18 m) hasta la abscisa 12.297 m (cota 1.179 m). Las mediciones se realizaron con un vertedero triangular de pared delgada, limnímetros, regletas graduadas y micromolinetes.

2.2. Actividades Realizadas

1. Determinación experimental del rango de caudales en el que se obtiene un funcionamiento adecuado del dissipador de energía considerando el diseño original;
2. Determinación teórica y experimental de las características del flujo de ingreso al dissipador de energía así como de las características del resalto producido;
3. Planteamiento de variantes geométricas y colocación de dispositivos para optimizar el funcionamiento hidráulico del dissipador de energía al pie de la rápida;
4. Definición de la configuración que optimiza la geometría original; y,
5. Verificación experimental del tipo de flujo que se produce en la zona de entrega del modelo.

2.2.1 Determinación de características del resalto hidráulico y de condiciones de entrada al cuenco

Para todos los caudales de ensayo se determinaron experimentalmente las condiciones de entrada al cuenco amortiguador en función del caudal específico q ; y, se estudió el funcionamiento del colchón dissipador con base en las mediciones de los diferentes calados en las secciones 14, 15, 16, 17, 18 y 19 del Prototipo (Ver Fig. 2). Se verificaron los parámetros de simetría, turbulencia, vibración y condiciones del flujo en todo el prototipo.

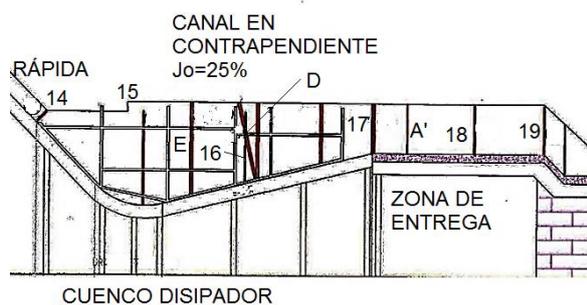


Figura 2. Cuenco dissipador.

2.2.2 Variación de geometría y dispositivos colocados

Con el fin de generar mayor disipación de energía a través de una expansión brusca y aprovechar las dimensiones del cuenco, se realizó una modificación en la geometría del prototipo reduciendo el ancho b de la rápida de 40 cm a 20 cm y siguiendo el mismo procedimiento indicado en el numeral anterior.

Con la nueva geometría del prototipo, se colocaron una serie de dispositivos en sitios específicos del cuenco dissipador y/o en las zonas de entrega del prototipo para incrementar la disipación de energía. Se observó el funcionamiento hidráulico del sistema y se obtuvieron conclusiones sobre su funcionamiento individual y colectivo. Cuando los dispositivos mejoraron el comportamiento del cuenco dissipador, se realizaron nuevas pruebas de investigación.

Los dispositivos colocados fueron:

Dados de disipación: Se colocaron estos dispositivos al final de la rápida y se diseñaron de acuerdo a las recomendaciones del Bureau of Reclamation. (Peterka, 1974).

Stoplogs: Estas estructuras de $h = 5\text{cm}$, fueron ubicadas en la zona de protección del cauce con el fin de confinar el resalto hidráulico en el cuenco.

Rejillas uniformizadoras o bandejas dissipadoras: Se colocaron estos dispositivos en diferentes posiciones y con diferentes grados de obstrucción y de inclinación para mejorar el comportamiento general del dissipador. El esquema de las rejillas se observa en la Fig. 3.

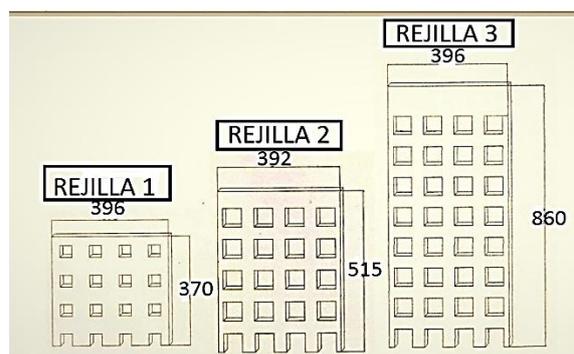


Figura 3. Rejillas dissipadoras (dimensiones en mm).

3. Resultados y discusión

Para todos los experimentos, el flujo que ingresa al dissipador es supercrítico ($6 < Fr < 14$) y simétrico respecto de su eje central. En ningún caso se observó afectación en las paredes laterales del cuenco por efecto de la macroturbulencia producida, por lo que se puede concluir que el fenómeno de abrasión no perjudicará el material de la pared. Respecto al tema de vibración, ésta se presenta en el modelo a partir de 10 l/s y se incrementa de manera proporcional al aumento de caudal. En la Tabla 1 se presenta un resumen de los experimentos realizados y sus respectivos resultados.

3.1. Resultados de pruebas adicionales en el prototipo optimizado

El rango de caudales en los que la optimización funciona adecuadamente (prueba 6) es desde 7 l/s ($q = 0.035 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) a 50 l/s ($q = 0.25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). Los caudales ensayados fueron 7 l/s, 17 l/s, 34 l/s y 50 l/s.

Para todos estos caudales, el flujo es simétrico respecto al eje central y en la sección final de la rápida se presentó flujo supercrítico ($6 < Fr < 10.30$). El dissipador trabajó eficazmente y en el canal de entrega se presentó régimen subcrítico ($0.27 < Fr < 0.90$) (Ver Fig.4).

Tabla 1. Resumen y resultados de pruebas ejecutadas.

#	Prueba	q_m m ³ /s/m	q_M m ³ /s/m	Zona de entrega	q_M/q_0
1	Geometría original (b=40cm)	0.013	0.068=q ₀	Fr.subcrítico fluctuación moderada	1.00
2	Geometría modificada (GM) (b=20cm)	0.015	0.155	Fr.subcrítico fluctuación moderada	2.30
3	GM +dados	-	0.050	Fuertes fluctuaciones	0.73
4	GM +stoplogs	0.015	0.155	Fr.subcrítico fluctuación moderada	2.30
5	GM +rejillas	varios	varios	Resultados varios	varios
6	Rejilla2 en D+Rejilla3 en E óptimo	0.035	0.25	Fr.subcrítico fluctuación moderada	3.7



Figura 4. Prototipo optimizado, $Q = 50l/s$, $q_M = 3.7 q_0$.

Con base en las mediciones efectuadas, se confirmó que el flujo es turbulento y que el efecto de la viscosidad es despreciable respecto al de la inercia. En la Tabla 2 se muestran los valores de calado, número de Froude y Reynolds para las secciones 14, 15, 16, 17,18 y 19 para los caudales específicos máximo (q_M) y mínimo (q_m) en el prototipo optimizado.

4. Conclusiones

Se logró optimizar el funcionamiento del dissipador de energía con forma trampolín liso más pendiente adversa a través de la reducción del ancho de la rápida y de la colocación de dos rejillas uniformizadoras en el canal de descarga en contrapendiente. La optimización permitió un adecuado funcionamiento del cuenco dissipador para un caudal específico 3.7 veces el caudal específico obtenido en la geometría original.

Tabla 2. Resultados obtenidos en el prototipo optimizado.

SECCIÓN PROTOTIPO	q_m (m ³ /s/m) = 0.035		q_M (m ³ /s/m) = 0.25	
	Reynolds 5.92E+04		Reynolds 2.61E+05	
	Calado	Froude	Calado	Froude
	cm	-	cm	-
14	1.5	5.99	3.9	10.3
15	61.0	0.01	77.0	0.06
16	44.8	0.02	60.8	0.08
17	7.3	0.29	21.0	0.41
18	5.8	0.41	18.0	0.52
19	4.3	0.64	12.5	0.90

El fenómeno de disipación en la configuración optimizadora es a través de la formación de tres resaltos hidráulicos; aguas arriba de la primera rejilla, entre las dos rejillas y aguas abajo de la segunda rejilla. La función de estos dispositivos es confinar el resalto y obstruir la salida.

Para continuar con la investigación se propone desplazar el eje de la rápida hasta que coincida con el eje del cuenco dissipador, realizar pruebas con otras ubicaciones y grados de inclinación de los dispositivos ensayados así como realizar modelaciones numéricas en programas especializados para establecer comparaciones y reforzar el conocimiento teórico del fenómeno.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos (CIERHI-EPN) por la colaboración e información proporcionada.

Referencias

Departamento de Ciencias del Agua, EPN. (2000) “Estudio en Modelo Hidráulico de las Obras de Derivación y Desvío de la Quebrada El Batán”.

McCorquodale, J. (1994). Hydraulic Jumps on Adverse Slopes. *Journal of Hydraulic Research*. Vol.32, 119-130.

Peterka,A. (1974). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Denver, USA: Salt Lake City Library.

Diseño de instalaciones hidráulicas experimentales con apoyo de la dinámica de fluidos computacional (CFD)

Design of hydraulic installations using computational fluid dynamics (CFD)

(Recepción 30/12/2016; Aceptación 06/04/2017)

Bayón, A.¹; Vallés Morán, F.J.²; Macián Pérez, J.F.³; López Jiménez, P.A.⁴

^{1,2,3}Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, València – 46022 (Spain)

⁴Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, s/n, València – 46022 (Spain)

Teléfono: (+34) 96 387 76 13

Email: arbabar@iiama.upv.es

Resumen. La cuantificación de pérdidas de carga causadas por elementos singulares en instalaciones hidráulicas no puede realizarse determinísticamente, por lo que debe llevarse a cabo su ensayo en laboratorio. No obstante, para el diseño del banco de ensayos es necesario estimar dichas pérdidas. En el presente trabajo, se plantea un método iterativo apoyado en un modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD). En concreto, se emplea el caso de una instalación para un tubo Venturi y la plataforma de código abierto OpenFOAM con cierre de turbulencia Standard $k-\epsilon$, obteniéndose así una instalación correctamente dimensionada para el análisis del rango de caudales deseado.

Palabras clave. Hidráulica experimental; Venturi; CFD; OpenFOAM, k -epsilon.

Abstract. The quantification of energy losses caused by singularities in hydraulic facilities cannot be deterministically conducted. To do so, laboratory tests must be performed. However, in order to design the necessary test benches, the losses to assess must be estimated. In the work presented herein, an iterative method supported by a computational fluid dynamics (CFD) model is presented. In particular, the case of facility for a Venturi tube is employed, along with the open-source code OpenFOAM, using the RNG $k-\epsilon$ turbulence closure. As a result, a well-designed facility capable of supplying the desired range of flowrates is obtained.

Keywords. Experimental hydraulics; Venturi; CFD; OpenFOAM; k -epsilon.

1. Introducción

La cuantificación de pérdidas de carga singulares causadas por los diferentes elementos de una instalación hidráulica no puede llevarse a cabo de forma determinística. Es por ello que estos elementos deben ensayarse en laboratorio a distintos caudales dentro de su rango normal de operación hasta obtener el valor del coeficiente de pérdidas K_V que correlaciona las pérdidas ocasionadas por el elemento en cuestión (Δh_V), generalmente expresadas en metros de altura de columna de agua (mca), con el cuadrado del caudal (Q):

$$\Delta h_V = K_V \cdot Q^2 \quad (1)$$

El problema surge a la hora de dimensionar el banco de ensayos, pues todos los elementos, especialmente, el grupo de bombeo, deben ser dimensionados para suministrar los caudales deseados y, como es sabido, dichos caudales dependen de las pérdidas a vencer en el conjunto de la instalación, incluyendo las causadas por el elemento cuyo factor K_V se desea cuantificar.

En el presente trabajo, se desarrolla una metodología para salvar este inconveniente, en la que se emplean técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD)

para aproximar a priori las pérdidas causadas por un elemento singular en una instalación hidráulica a presión, en este caso, un tubo Venturi, en combinación con los métodos convencionales de diseño de instalaciones hidráulicas a presión.

2. Materiales y métodos

2.1. Instalación hidráulica

La instalación cuenta con elementos preexistentes, tales como un depósito atmosférico de gran capacidad y una bomba centrífuga situada en aspiración, cuya curva motriz a $f = 50$ Hz, obtenida experimentalmente con un $R^2 = 0.9998$ y expresada en unidades del S.I., se aproxima a la función siguiente:

$$H_b = 12.2 \alpha^2 + 97.1 \alpha Q - 1,132.8 Q^2 \quad (2)$$

Donde α es la variación relativa de la frecuencia de alimentación de la bomba. La Fig. 1 muestra un esquema del diseño de la instalación, incluyendo los elementos preexistentes y los tramos que constituyen el banco de pruebas.

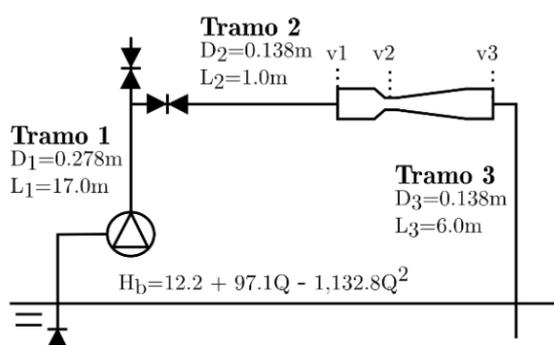


Figura 1. Esquema general de la instalación experimental.

La cuantificación del coeficiente de pérdidas continuas (r) se lleva a cabo mediante la expresión de Darcy-Weisbach para flujo incompresible:

$$r = \frac{8 f L}{\pi^2 g D^5} \quad (3)$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, D , el diámetro interior de la conducción, L , la longitud de ésta y f , el factor de fricción, estimado mediante la ecuación de Colebrook-White para flujo turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (4)$$

Donde ε es la rugosidad absoluta de la conducción y Re , el número de Reynolds, función del diámetro interior de ésta, el caudal y la viscosidad cinemática del fluido trasegado (ν):

$$Re = \frac{4 Q}{\pi D \nu} \quad (5)$$

Las pérdidas locales de los distintos elementos singulares de la instalación se tienen en cuenta añadiendo a la longitud de cada conducción (L) un número de diámetros equivalentes (L_{eq}) según el tipo de elemento, de modo que la longitud total para el cálculo de la Ec. (3) resulta:

$$L_T = L + L_{eq} \quad (6)$$

La distancia en diámetros equivalentes según elemento, resumida en la Tabla 1, se encuentra disponible en la bibliografía técnica específica, como Mataix (1982), Sotelo (1982) o White (1994).

Al tratarse de un circuito cerrado, el punto de funcionamiento de la instalación se obtiene igualando la expresión de la curva motriz de la bomba (2) a la suma de las pérdidas de carga singulares y continuas de los tres tramos del circuito, generalizando la Ec. (3) a los tres tramos de la instalación y añadiendo las pérdidas causadas por el dispositivo a ensayar, adaptando la Ec. (1):

$$\Delta h = \left(\frac{8}{\pi^2 g} \sum_{i=1}^{i=3} \frac{f_i L_{T,i}}{D_i^5} + K_V \right) \cdot Q^2 \quad (7)$$

Tabla 1. Número de singularidades por tramo con correspondencia en número de diámetros equivalentes.

	Tr. 1	Tr. 2	Tr. 3	L_{eq}
Nº válv. reguladora	1	1	0	50 D
Nº codo 90°	3	1	1	16 D
Nº conexión en T	1	1	0	40 D
Nº válv. pie oscilante	1	0	0	75 D
Salida de tubería	0	0	1	45 D
Reducción	1	1	0	65 D

Como siempre, dicho proceso debe realizarse iterativamente, al ser el factor de fricción dato para el cálculo del caudal de funcionamiento y, a la vez, dependiente de éste, lo que se realiza de forma sencilla mediante un algoritmo de optimización numérica.

2.2. Modelo CFD

A fin de calcular el punto de funcionamiento de la instalación es necesario conocer el coeficiente de pérdidas del elemento que, justamente, se desea analizar. Para ello, se emplea un modelo CFD del dispositivo en cuestión, obteniéndose un valor aproximado de K_V , pudiendo entonces procederse a estimar las pérdidas según se indica en la Ec. (1).

En el caso de estudio analizado en el presente trabajo, un tubo Venturi con finalidad experimental, las dimensiones se hallan en el alzado de la Fig. 2 ($a = 0.138\text{m}$, $b = 0.040\text{m}$, $c = 0.057\text{m}$, $d = 0.030\text{m}$, $e = 0.278\text{m}$, ancho = 0.138m).

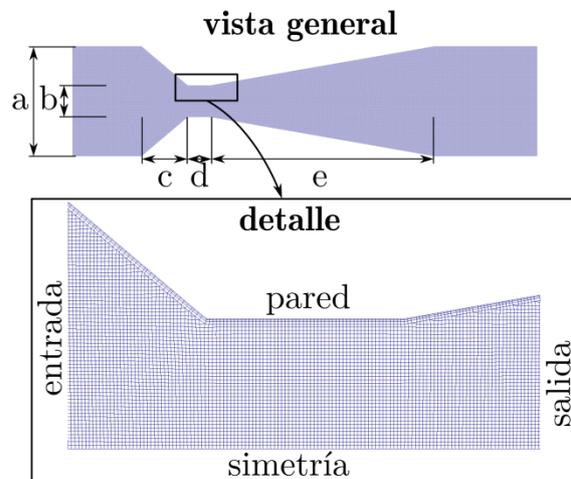


Figura 2. Malla numérica, dimensiones y condiciones de contorno.

El modelo CFD empleado se basa en la hipótesis de flujo newtoniano, incompresible, monofásico, turbulento, isotrópico y estacionario. A fin de economizar recursos computacionales y dado que se pretende realizar un cálculo aproximativo, según se explica en Bayón y López-Jiménez (2015), se emplea un modelo bidimensional con cierre de turbulencia RANS Standard k- ε (Launder y Sharma, 1974). Se adopta el método de discretización de los volúmenes finitos (FVM) en su implementación en la plataforma de libre acceso basada en librerías y aplicaciones en C++ OpenFOAM.

La discretización del dominio a modelar se realiza mediante una malla estructurada de elementos cuadrados por las ventajas que éstas presentan respecto a sus contrapartes no estructuradas (Bayón et al., 2016). Dicha malla es creada mediante las aplicaciones blockMesh y snappyHexMesh, integradas en OpenFOAM. El tamaño de las celdas de la malla es $\Delta x = 0.56 \text{ mm}$, lo que da pie a una malla de 101,391 elementos, si se tiene en cuenta que, como se muestra en la Fig. 2, se añaden tres capas de elementos de tamaño decreciente en las zonas de contacto con contornos sólidos a fin de refinar la malla donde se esperan mayores gradientes, debido al desarrollo de capas límite y, en el caso de un tubo Venturi, también a la ocurrencia de despegues de flujo.

La elección del tamaño de celda $\Delta x = 0.56 \text{ mm}$ proviene de un análisis de convergencia de malla, para el que se ha aplicado la metodología desarrollada en Celik et al. (2008) a cinco mallas de la Tabla 2, refinadas con un coeficiente de $r = 1.5$ entre tamaños sucesivos, es decir, con un coeficiente de refinamiento global de $r_g = 5$, muy superior al mínimo de $r_{g(\text{min})} = 1.3$ estipulado por Celik et al. (2008).

Tabla 2. Características de las mallas empleadas en el análisis de convergencia de malla.

	Δx (mm)	Nº celdas	y^+ min	y^+ max
Malla 1	0.373	225,126	6	51
Malla 2	0.560	101,391	9	66
Malla 3	0.830	45,908	12	87
Malla 4	1.250	20,768	18	117
Malla 5	1.877	9,570	27	166

Los resultados de dicho análisis muestran que, para $\Delta x = 0.56 \text{ mm}$, se alcanza un orden aparente de $p = 0.97$, muy próximo al orden formal del modelo, aumentando dicha variable, tanto en los tamaños mayores, como los menores, donde los bajos valores de y^+_{min} denotan que se está peligrosamente cerca de la subcapa laminar, por lo que el modelo de pared de alto número de Reynolds empleado no opera como debería (Schlichting y Gersten, 2000). Para el tamaño de malla en cuestión, se alcanza un índice de convergencia de malla del $GCI = 3.3\%$ y un error aproximado de $e_a = 5.6\%$, valor mínimo en comparación con las otras mallas.

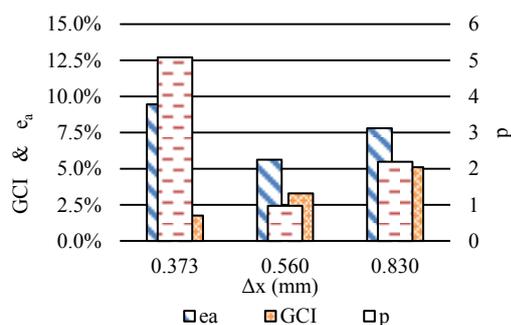


Figura 3. Orden aparente del modelo (p), índice de convergencia de malla (GCI) y error aproximado (e_a) según tamaño de malla.

Respecto a las condiciones de contorno, se impone a la entrada una velocidad constante con condición de contorno de Von Neumann nula para la presión, al contrario que la salida, donde a la presión se le impone una condición de Dirichlet nula, representando una salida libre. A los contornos sólidos se les impone condición de no deslizamiento y una función de pared de alto número de Reynolds, como se explica en Bayón y López-Jiménez (2015), habiendo de asegurarse que la coordenada y^+ se mantiene siempre cerca de $y^+ \sim 30$. A fin de reducir a la mitad el número de elementos de la malla y, en consecuencia, los tiempos de cálculo, se impone una condición de contorno de simetría a la sección longitudinal central del dominio, como se muestra en la Fig. 2.

3. Análisis de resultados

La Fig. 4 muestra una representación gráfica de los resultados del modelo CFD, donde se aprecia el aumento de la velocidad y la consiguiente caída de la presión en la zona de la garganta del tubo Venturi, indicándose las zonas donde la presión cae por debajo de la presión de vapor del agua (p_v), es decir, donde cabe esperar la formación de burbujas de cavitación, lo que constituye el objetivo del dispositivo experimental diseñado en el caso de estudio expuesto.

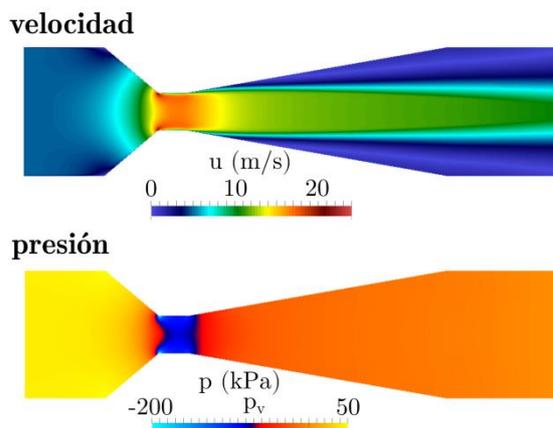


Figura 4. Campo de velocidades y presiones resultante. Las zonas en oscuro del gráfico inferior indican zonas de cavitación.

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre las secciones inicial y final del modelo, al estar a la misma cota y ser la velocidad constante en ambas, la caída de la presión estática media entre secciones, observable en la Fig. 4, constituye la pérdida de carga causada por el dispositivo (Δh_V). Conocido el caudal impuesto al modelo CFD, la Ec. (1) permite conocer el coeficiente de pérdidas del dispositivo que, en este caso, resulta ser $K_V = 560 \text{ mca}/(\text{m}^3/\text{s})^2$.

Con este dato, se puede calcular el punto de funcionamiento de la instalación siguiendo el proceso iterativo descrito anteriormente. En el caso de estudio expuesto, se obtiene un caudal de funcionamiento de $Q_f = 80 \text{ l/s}$ para un régimen de giro de la bomba de $\alpha = 0.89$ ($f = 44.5 \text{ Hz}$). En esta situación, las

pérdidas ocurridas en los tres tramos se representan en la Tabla 3. Todas ellas, sumadas también a las causadas por el tubo Venturi ($\Delta h_V = 3.58 \text{ mca}$), resultan en la altura del punto de funcionamiento, $H_f = 9.32 \text{ mca}$.

Tabla 3. Pérdidas de carga, en mca, continuas (Δh_c), singulares (Δh_s), del Venturi (Δh_V) y totales (Δh) por tramo de la instalación.

Tramo	1	2	3
Δh_c	0.08	0.14	0.82
Δh_s	0.35	3.21	1.14
Δh_V	-	3.58	-
Δh	0.43	6.92	1.96

4. Conclusiones

El presente trabajo plantea un método de diseño de instalaciones hidráulicas experimentales para la caracterización de las pérdidas de carga de elementos singulares, tales como válvulas, codos, cambios de sección, etc. Para ello, amén del modus operandi habitual, igualando la curva motriz de la bomba con la curva resistente de la instalación, estimándose las pérdidas de carga de forma iterativa mediante métodos semiempíricos, se plantea el empleo de un modelo CFD relativamente fácil de implementar y cuyos tiempos de cálculo no exceden las pocas horas. Con ello, se obtiene una estimación de las pérdidas causadas por el dispositivo a analizar, ya que éstas, obviamente, no se conocen y constituyen un dato necesario para el diseño del conjunto de la instalación.

Los resultados obtenidos son satisfactorios y, dado que la instalación todavía no ha sido ejecutada, no se dispone de datos experimentales para su validación. No obstante, los resultados se mantienen dentro del orden de magnitud esperable en casos de estas características.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido posible en el marco del proyecto HIDRASENSE (Plan Estatal de I+D+i MINECO, Convocatoria Retos-Colaboración 2014).

Referencias

Bayón, A. y López-Jiménez, P.A. (2015) "Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM", *J. of Hydroinformatics*, 17(4):662-678.

Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J. y 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.

Celik, I.B., Ghia, U., & Roache, P.J. (2008) "Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications", *Journal of Fluids Engineering*, 130(7):1-4.

Lauder, B.E. y Sharma, B.I. (1974) "Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1: 131-138.

Mataix, C. (1982) "Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas". Ed. del Castillo S.A., México.

Schlichting, H. y Gersten, K. (2000) "Boundary-Layer Theory", Springer, Germany.

Sotelo, A.G. (1982) "Hidráulica general". Vol. I, Ed. Limusa S.A., México.

White, F.M. (1994) "Fluid Mechanics". McGraw-Hill, USA.

Implementación de un modelo de autómatas celulares para simular transporte de solutos a través de un medio poroso

Implementation of a cellular automata model to simulate the transport of solutes through a porous medium

(Recepción 31/12/2016; Aceptación 24/04/2017)

Lora Ariza, B.J.¹; Bayuelo Sierra, A.J.²; Lora Castro, B.J.³; Donado Garzón, L.D.⁴

¹Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 LEH (408-207) Bogotá.

²Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 LEH (408-207) Bogotá

³Universidad del Atlántico, Km 7 vía al Puerto Colombia. Bloque C of 601 Barranquilla.

⁴Universidad Nacional de Colombia, Av NQS # 45 -03 Lab Hidráulica (409-310) Bogotá.

Teléfono: +57 3005642813.

Email: bjlora@unal.edu.co

Resumen El transporte de solutos conservativo a través de un medio poroso, ha sido ampliamente estudiado a partir de la ecuación de Advección Dispersión (ADE) la cual se soluciona generalmente mediante los métodos numéricos tradicionales (elementos finitos, diferencias finitas, volúmenes finitos). En el presente artículo se propone un modelo estocástico 2-dimensional de autómatas celulares por medio del cual es posible simular el transporte de solutos a través de un medio poroso.

Palabras clave. Autómatas celulares, Transporte de solutos, medio poroso.

Abstract. The transport of conservative solutes through a porous medium has been extensively studied using the Equation of Advection Dispersion (ADE) usually solved by traditional numerical methods (finite differences, finite elements, and finite volumes). In this paper a 2-dimensional stochastic cellular automata model which allows to simulate the transport of contaminants through a porous medium is proposed.

Keywords. Cellular automata model, transport of solutes, porous medium.

1. Introducción

Las autómatas celulares (CA) fueron inventadas a finales de la década del 40 por Von Neumann y Ulam (Von Neumann, 1948). Estas fueron definidas como una colección de celdas (autómata individual) en una retícula en forma específica que evolucionan a través de un número de pasos discretos de acuerdo con un conjunto finito de reglas que se basan en las celdas vecinas (Zenil, 2009). De aquí que, un autómata celular está conformado por una estructura reticular, un conjunto de valores (estados) y una serie de reglas que describen cómo evolucionan los estados de una vecindad.

El transporte de solutos conservativo a través de un medio poroso, ha sido ampliamente estudiado. Sin embargo, tanto los procesos físicos como los químicos inherentes al transporte de solutos, han sido abordados principalmente considerando la ecuación diferencial de Advección-Dispersión (ADE), generalmente mediante métodos numéricos tales como Elementos Finitos, Diferencias Finitas y Volúmenes Finitos, incurriendo en algunos casos a errores numéricos (difusión numérica, entre otros).

Por ello, en el presente artículo se propone un modelo de autómatas celulares (CAM), que permita simular el transporte de solutos a través de un medio poroso homogéneo y uno heterogéneo estratificado (dos estratos) cualitativamente, es decir que mediante una

variable booleana se indica si hay o no presencia del soluto en el pixel analizado. Por ello, el modelo propuesto, no permite determinar cuantitativamente la dispersión hidrodinámica del soluto transportado, pero sí describir su comportamiento hidrodinámico.

Cabe resaltar que el modelo fue construido mediante un código computacional empleando el lenguaje de programación C++ y el facilitador IDE NetBeans.

2. Tipo de Autómata celular

Los autómatas celulares suelen clasificarse de acuerdo a la estructura que poseen: según la dimensión, el tipo de vecindad, el comportamiento cualitativo de la evolución y sus reglas de transición. En este caso se consideró un espacio bidimensional el cual simula un corte longitudinal de un acuífero y una vecindad cuadrada de 5 x 5 píxeles.

En cuanto al comportamiento cualitativo de la evolución, los CA pueden ser clasificados según (Wolfram, 1983) en cuatro clases: (I) todos los estados iniciales convergen uniformemente a un estado final, (II) los estados iniciales convergen a varios estados finales siguiendo un conjunto limitado de estructuras simples que permanecen constantes a lo largo del tiempo o se repiten periódicamente (III) los estados iniciales cumplen un comportamiento similar al de la clase II con la diferencia que los patrones de repetición no son fácilmente identificables, por último en la clase (IV) se



presentan patrones que implica una mezcla de orden y aleatoriedad (Huerta Trujillo, 2009). Sin embargo, es posible desarrollar modelos de autómatas celulares que presenten reglas de transición no contenidas en esta clasificación (Juarez, 2000).

El modelo propuesto considera reglas de transición estocásticas generadas a partir del entrenamiento del modelo físico bidimensional (Sand box) el cual representa un acuífero confinado (homogéneo o heterogéneo estratificado), asemejándose a la clase IV propuesta por Wolfram (Wolfram, 1983).

La formulación algorítmica del modelo CA propuesto es presentado mediante el pseudocódigo presentado en la Fig. 1.

```

función ActualizarReticula(int sandbox[ ][ ], diccionario reglas,
                           int n, int m)
devuelve int[ ][ ]
entradas: sandbox, matriz de int de n, m donde sandbox[i][j]
           ∈ {0,1,2}, 0 ≤ i, j < n
           reglas, diccionario que relaciona estados con transición
           n, entero que representa el número de filas de sandbox
           m, entero que representa el número de columnas de sandbox
salida: matriz que representa la retícula actualizada
estáticas: resultado, matriz de n, n donde resultado[i][j] ∈ {0,1,2},
           0 ≤ i, j < n
Para cada i en 0 → n - 1 hacer
  Para cada j en 0 → m - 1 hacer
    estado ← vecindario(sandbox[i][j])
    α ← aleatorio(0,1)
    resultado[i][j] = escoger(reglas, estado, α)
  fin para
fin para
devolver resultado
    
```

Figura 1. Formalización algorítmica del método CA.

Este algoritmo corresponde al sustento conceptual del paradigma de los autómatas celulares. En él, es presentada una función *ActualizarReticula* la cual tiene como entrada una matriz [*i*][*j*] en el instante *t*, que corresponde al tamaño del sandbox entendido como una gran matriz en la que los elementos de la misma pertenecen al conjunto de enteros [1,3], donde 1 corresponde a una arena fina sin trazador, 2 una arena gruesa sin trazador y 3 la presencia de trazador. Se recorre el sandbox (matriz), y seleccionando probabilísticamente una regla de transición, se genera un nuevo estado para el sandbox en el instante *t*+1.

3. Adquisición de datos

Una de las dificultades en el estudio del comportamiento de procesos hidrogeológicos radica en la imposibilidad de la observación directa de los fenómenos que ocurren bajo tierra. Por ello, uno de los mecanismos experimentales utilizados en la actualidad son los modelos físicos bi-dimensional conocidos como Sand Boxes. Ellos son fabricados en materiales transparentes los cuales permiten la visualización de los procesos de transporte que ellos acaecen. Para esta investigación se construyó uno fabricado en acrílico (Fig. 2).

En él, se realizó un ensayo de trazador en un acuífero confinado con una inyección continua de Eosina Amarillenta Tipo Y. Durante éste, se tomaron fotografías digitales de alta resolución (18 Megapíxeles) cada minuto, las cuales fueron procesadas eliminando el ruido producido por efectos ópticos externos.

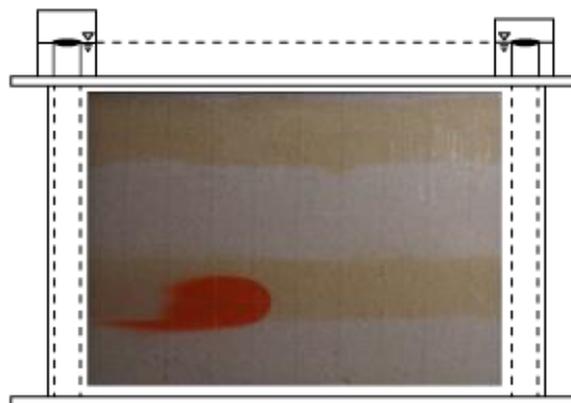


Figura 2. Esquema del Sandbox empleado (Elaborado por el autor).

En el CA propuesto se consideraron tres (3) clases, la primera representa al medio poroso con una granulometría gruesa (Arena tamiz # 30), la segunda una granulometría fina (Arena tamiz # 50) y la tercera la presencia de trazador (Tabla 1). Además, se realizó una segmentación de las imágenes determinando a cuál de las tres clases pertenece cada píxel (Fig. 3).

Tabla 1. Caracterización del medio poroso.

Tipo de Arena	<i>K</i> (<i>md</i> -1)	<i>d</i> ₆₀	<i>d</i> ₁₀	<i>Cu</i>	<i>n</i>
30	225	900	590	1.52	0.45
50	16	390	160	2.43	0.35

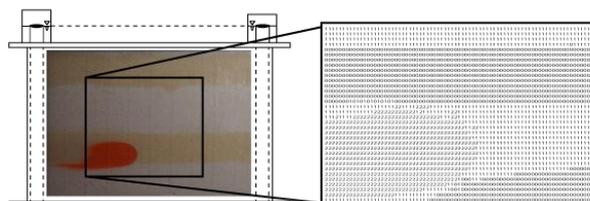


Figura 3. Segmentación de las imágenes (Elaborado por el autor).

4. Entrenamiento del modelo

Durante la etapa de aprendizaje, o entrenamiento de un modelo de CA, una de las mayores dificultades radica en determinar las reglas de transición a partir de la influencia que presentan los elementos de una vecindad a nivel temporal sobre el píxel (celda) central de la misma (Escandell Montero, 2014).

Para ello, se definió un diccionario, esquematizado en la (Fig. 4), donde se considera una vecindad (D2Q25, D: Dimensión del espacio, Q: número de píxeles de la vecindad) la cual en el instante *T* es denominada la llave, y en el instante *T*+1, es considerada un elemento asociado a ésta llave.

Para determinar cuál es la regla a seleccionar dentro del directorio, se realiza una escogencia probabilística de un elemento para cada llave. Es decir, dado que cada llave (estado inicial) tiene asociada varios elementos (estados de la vecindad en

el siguiente instante), se escogerá la regla de transición por probabilidad entre los diferentes elementos asociados a cada llave, mediante la generación de un número aleatorio x en el intervalo $[0,1)$.

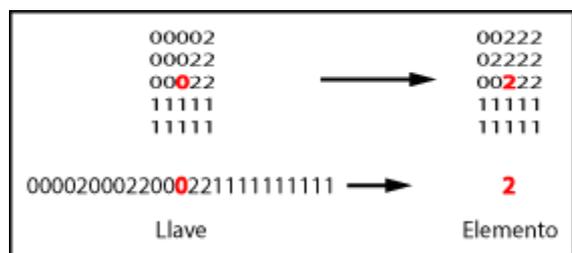


Figura 4. Definición de las llaves y los elementos asociados a ella. (Elaborado por el autor).

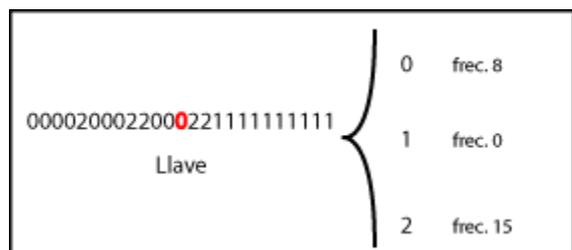


Figura 5. Selección de las reglas de transición (Elaborado por el autor).

Por ejemplo, en la Fig. 5, el pixel central de la vecindad (cero, 0) permutará a la clase 1 con una probabilidad nula (Esto porque el medio poroso se mantiene constante en función del tiempo), a 2 con una probabilidad $P(2)=15/23$, y no cambiará con una probabilidad de $P(0)= 8/23$.

Lo anterior, es descrito algorítmicamente mediante el siguiente pseudocódigo (Fig. 6), en el cual se define una función *probabilidad_acumulada*, la cual es inicializada en cero, y a ésta se le va sumando la probabilidad de ocurrencia de cada elemento de cada una de las llaves. Además se define una constante aleatoria α que hace las veces de criterio de selección de la regla a escoger para cada llave (estado). Así pues, si la *probabilidad_acumulada* es mayor que la variable α , se seleccionará la regla de transición definida por la llave y el último elemento al cual se le acumuló su probabilidad de ocurrencia.

```

función escoger(diccionario reglas, int [][] estado, float  $\alpha$ )
devuelve int
entradas: reglas, diccionario que relaciona estados con transiciones
          estado, matriz de int de  $l \times l$  que representa una vecindad
           $\alpha$ , número real  $\in [0,1)$ 
salida: entero que representa la transición del centro de la vecindad
probabilidad_acumulada  $\leftarrow 0$ 
Para cada (transición, probabilidad) en reglas[estado]hacer
    probabilidad_acumulada
     $\leftarrow$  probabilidad_acumulada + probabilidad
    si (probabilidad_acumulada >  $\alpha$ ) entonces
      devolver transición
    fin si
fin hacer
    
```

Figura 6. Algoritmo de selección probabilística de las reglas de transición.

5. Resultados

Luego de aplicar el modelo CA anteriormente descrito y al transporte de solutos en medio poroso, es posible observar cualitativamente la alta correlación existente entre la simulación y las dinámicas de los fenómenos de transporte monitoreadas en el modelo físico (Fig. 7).

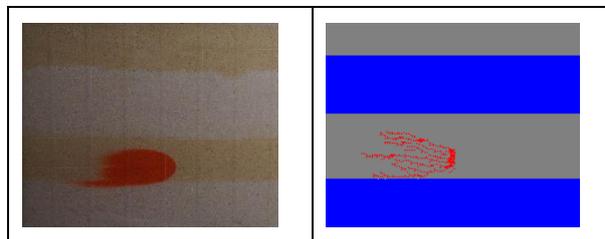


Figura 7. Relación entre la simulación y el modelo físico (Elaborado por el autor).

El modelo propuesto además permite seleccionar la configuración estratigráfica del medio poroso a analizar variando el espesor de cada estrato y tolera escoger uno o varios puntos de inyección del trazador (ver Fig. 8).



Figura 8. Interface gráfica del modelo de CA (Elaborado por el autor).

6. Conclusiones

Esta investigación hace posible pensar que la aplicación de modelos de Autómatas Celulares a los estudios de transporte de contaminantes en hidrogeología puede ser útil a futuro.

Sin embargo, esta metodología requiere de un amplio número de experimentos para entrenar el modelo, repercutiendo así en elevados costos, tiempo de calibración, y limitaciones en cuanto a las posibles configuraciones del medio poroso equivalente a estudiar.

Los CA fueron concebidos originalmente para el análisis de datos booleanos, razón por la cual en esta investigación se analizó el transporte de solutos sin tener en cuenta las variaciones en la concentración del mismo, temporal y espacialmente, sino únicamente considerando la presencia o no de contaminante en un punto específico. Por ello, no es posible cuantificar la dispersión hidrodinámica mediante la implementación del código propuesto, pero sí analizar cualitativamente el comportamiento hidrodinámico del soluto transportado.

Adaptaciones a este método, que utilicen una mayor segmentación (rangos de concentración del trazador), permitirían obtener soluciones cuantitativas posibilitando una mejor comprensión de los procesos hidrogeológicos y de transporte estudiados. Además, será posible obtener curvas de llegada BTC (Breakthrough Curve, Concentración vs Tiempo) a partir de las cuales se corroborará el principio de conservación de la masa, al integrar la función que describe dicha curva en varios puntos del sandbox (matriz universo).

Fenómenos de intrusión salina, zonas de mezcla, y e incluso transporte reactivo son susceptibles de ser abordados a partir de ésta metodología.

En ciencia, es importante considerar todas las alternativas a la hora de simular los fenómenos de la naturaleza. Por ello, abordar por primera vez la modelación de solutos desde el enfoque de los autómatas celulares es enriquecedor y abre la puerta a un camino, hasta ahora, no explorado.

Agradecimientos

Se le agradece al Laboratorio de Ensayos Hidráulicos de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá por facilitar las instalaciones y equipos requeridos para desarrollar ésta investigación adecuadamente.

Referencias

Antigüedad, I., Ibarra, V., & Morales, T. (1989). Los trazadores en la hidrogeología kárstica: Metodología de su uso e interpretación de los ensayos de trazado. *MUNIBE*, 41 (31-45).

Escandell Montero, P. (2014). *Aprendizaje por refuerzo en espacios continuos: algoritmos y aplicación al tratamiento de la anemia renal*. Valencia: Universitat de Valencia.

Huerta Trujillo, I. (2009). *Simulación de sistemas naturales usando autómatas celulares*. Mexico: Instituto Politécnico Nacional. Centro de investigación en computación.

Juarez, G. J. (2000). *Teoría del campo promedio en Autómatas Celulares Similares a "The game of the life"*. Mexico.

Von Neumann, J. (1948). *The Computer and the Brain*. New Haven and London: Yale University Press.

Wolfram, S. (1983). statistical mechanics of cellular automata. *Reviews of Modern Physics*, (55):601–644.

Zenil, H. (2009). Compression-based investigation of the dynamical properties of cellular automata and other systems. *Complex systems publication inc*, 1-3.

