2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-04

Artículos

Modelación física de erosión en estructuras de baja altura con saltos esquí

Physical modeling of erosion in low height structures with ski jumps

Matías Eder[1]

Gerardo Hillman[2]

Leticia Tarrab[3]

Mariana Pagot[4]

Andrés Rodríguez[5]

[1]Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Buenos Aires, Argentina, matiaseder@unc.edu.ar, ORCID: 0000-0003-0624-5781

[2]Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, ghillman@efn.uncor.edu

[3]Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, ltarrab@gmail.com, leticia.tarrab@unc.edu.ar, ORCID:0000-0002-5594-4848

[4]Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, mariana.pagot@unc.edu.ar, ORCID:0000-0002-7435-3381

[5]Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet), Buenos Aires, Argentina, androdminplan@gmail.com, andres.rodriguez@unc.edu.ar, ORCID:0000-0002-4110-6464

Autor para correspondencia: Matías Eder, matiaseder2@gmail.com, matiaseder@unc.edu.ar

Resumen

La erosión local aguas abajo de estructuras hidráulicas puede comprometer la seguridad de las mismas. En el caso de obras con estructura terminal tipo salto de esquí hay vastos estudios e

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

investigaciones disponibles que proponen formulaciones teórico-experimentales para estimar la máxima profundidad de erosión. Sin embargo, las incertidumbres que aún existen en este tipo de fenómenos llevan a la necesidad de abordarlos mediante técnicas experimentales detalladas. En este trabajo se presenta un estudio experimental de erosión local aguas abajo de estructuras hidráulicas de baja altura con salto de esquí, donde la descarga se hace sobre un río de gravas; se comparan los resultados experimentales con los de fórmulas empíricas que aparecen en el estado del arte, validando el grado de aplicabilidad de las mismas.

Palabras clave: modelo físico, erosión local, fondo móvil, disipador tipo salto esquí.

Abstract

Local erosion downstream of hydraulic structures can compromise their safety. In the case of works with ski jumps, there are fewer empirical studies and empirical formulas to estimate the maximum depth of erosion. Moreover, the uncertainties that still exist in this kind of phenomenon, leads to the need to analyze these problems through detailed experimental techniques. This paper presents an experimental study of local erosion occurs downstream of hydraulic structures low altitude with sky jump dissipator in a river gravels and finally the experimental results obtained with the empirical formulas of the prior art are compared.

Keywords: Physical model, local erosion, movable bed, Sky jump dissipator.

Recibido: 09/03/2017

Aceptado: 08/11/2018

Introducción

La erosión local aguas abajo de estructuras hidráulicas en cursos fluviales ha sido estudiada por diversos autores, llegando a formulaciones empíricas que permiten estimar la profundidad máxima

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

de erosión aguas abajo de la misma (p. ej., Mason & Arumugam, 1985; Lopardo, 2005; Heng, Tingsanchali, & Suetsugi, 2013). Sin embargo, para el caso de obras de baja altura con saltos esquí, son escasos los antecedentes, y subsisten aún incertidumbres en el comportamiento de tales estructuras, de la interacción fluido-estructura y de los procesos de erosión local. De manera habitual, la solución a dichos problemas se aborda mediante la modelación física, y el desarrollo y aplicación de técnicas experimentales, más que con modelos numéricos. En tal contexto se utilizan modelos físicos de fondo móvil, en los cuales el parámetro más difícil de reproducir con distorsión mínima es el material del fondo móvil, donde el caso más simple de arrastre de una partícula bajo flujo uniforme y permanente depende de numerosas variables, en particular de las características del material sólido, naturaleza del fluido, características dinámicas del escurrimiento y fuerzas de masa actuantes sobre las partículas (Fuentes, 2002; Lopardo, 2005).

El objetivo de este estudio fue caracterizar la erosión local aguas abajo de estructuras de descarga de baja altura con saltos esquí en un modelo físico de fondo móvil, para lo cual fue necesario realizar un análisis de la granulometría óptima, para representarla en el lecho móvil del modelo físico.

Caso de estudio

El caso de estudio es el dique de derivación Los Molinos, ubicado en la provincia de Jujuy, Argentina (UNC, 2012). Esta obra está emplazada sobre el río Grande, aguas arriba de la ciudad de San Salvador de Jujuy y aproximadamente a 1 km aguas abajo de su confluencia con el río Reyes (Figura 1). El dique derivador está conformado por tres estructuras de descarga: sobre la margen izquierda del cauce se ubica un azud fijo (dique fijo, DF), el cual se encuentra separado de las estructuras móviles por un muro guía; las estructuras móviles consisten en un vertedero controlado por cuatro compuertas de sección circular (dique móvil, DM), y un descargador de fondo o canal moderador (CM), regulado por dos compuertas planas; finalmente, sobre la margen derecha de la presa se encuentra la obra de toma (Figura 2).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

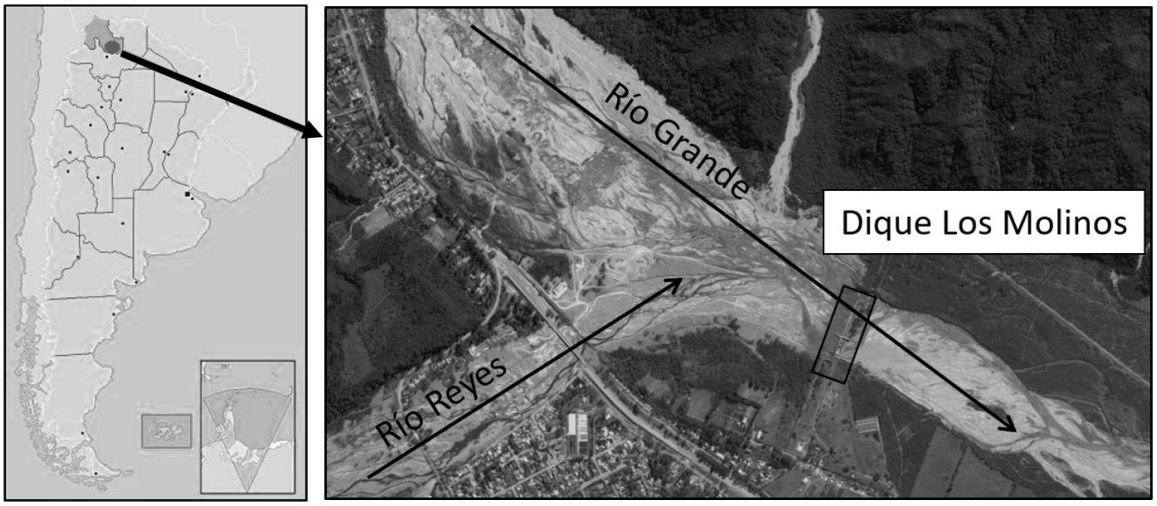


Figura 1. Emplazamiento del dique Los Molinos (*Google Earth*, 2012).

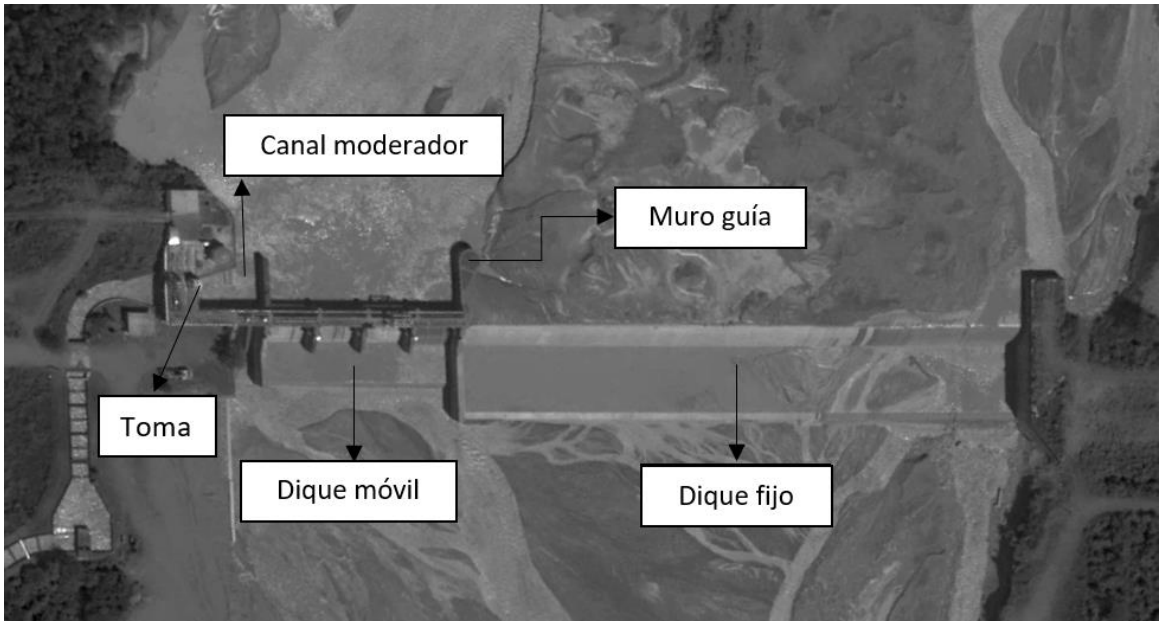


Figura 2. Vista aérea del Prototipo mostrando las estructuras del dique Los Molinos (*Google Earth*, 2012).

Desde su construcción, la obra ha afectado el transporte de sedimentos. En los primeros años se generó una interrupción del flujo de sedimentos desde el sector de aguas arriba hacia el de aguas abajo. Este proceso llevó a la colmatación del embalse y dio lugar a un descenso generalizado del cauce aguas abajo de la presa de unos 9 m. Esta nueva configuración del entorno de la presa se aparta de las

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

condiciones de diseño de la obra original y se tradujo en un comportamiento anómalo de las estructuras de disipación de energía, lo cual generó erosiones locales al pie de las estructuras y sobre la margen derecha del canal moderador. Para adaptar las estructuras a la nueva configuración, se proyectaron obras de refuncionalización. Estas obras consistieron en una modificación de los perfiles originales del dique fijo, dique móvil y canal moderador por saltos de esquí. Estas estructuras tienen como objetivo alejar la zona de disipación de energía y sus consecuentes erosiones del pie de la estructura; es decir, no se busca reducir o evitar las erosiones, sino que las mismas no afecten la estabilidad de las obras existentes. Sin embargo, como obra estructural complementaria para evitar problemas de estabilidad del dique, se proyectó durante los trabajos de reparación un muro colado de hormigón armado construido *in situ* en el cauce, inmediatamente aguas abajo de las tres estructuras de descarga, cuya cota inferior surge de un estudio geotécnico complementario, considerando las profundidades máximas de erosión estimadas en este trabajo, su ubicación y las características del material del lecho.

Materiales y métodos

Instalación experimental

Los ensayos se realizaron en el modelo físico del dique Los Molinos (Jujuy, Argentina), diseñado con el objetivo de evaluar el funcionamiento hidráulico de las obras de refuncionalización del dique. Consiste de un modelo físico tridimensional (3D), con similitud de Froude, escala de longitudes no distorsionada (E_L = 1:65) y fondo mixto, con márgenes fijas y fondo móvil en el cauce aguas abajo de la presa.

En el modelo físico se representan los contornos de las tres estructuras de descarga (dique fijo, dique móvil y canal moderador) con sus estructuras de control (compuertas). El dominio del modelo se extiende hacia aguas arriba de la presa, abarcando los tramos de aproximación del río Grande y del río Reyes con su confluencia

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(aproximadamente 1 000 m); aguas abajo el modelo se extiende unos 500 m en prototipo. Dicha distancia fue definida de forma tal que las condiciones de borde impuestas aguas abajo no afectaran el comportamiento del flujo en la zona de erosión.

Para definir la geometría de cauce en la zona de aproximación a las obras se aplicó el método de la geometría del cauce. Este método permitió determinar el ancho *B*, la profundidad *H* de la sección transversal y la pendiente *S*, en función de un caudal dominante (Farias, 2005). Para determinar el caudal dominante se aplicó un criterio estadístico que se basa en asociar este caudal con una recurrencia entre 1.4 años y 2.33 años. Se adoptó como caudal dominante 600 m^3/s, correspondiente a una recurrencia de dos años, resultando un ancho de régimen de 110 a 150 m.

Las condiciones de contorno aguas abajo (niveles de restitución) se calcularon mediante simulación numérica unidimensional en régimen permanente utilizando el programa *HEC-RAS* (USACE).

Material del fondo móvil

En un modelo físico a fondo móvil con transporte de sedimentos, los resultados son altamente dependientes de la distribución granulométrica inicial. Producto de la imposibilidad de conseguir la semejanza hidromorfológica, se debe seleccionar aquella granulometría en modelo que represente la física relevante del prototipo (acorazamiento, erosión generalizada y macroformas).

Para representar el lecho móvil en el modelo se ha utilizado un material natural de similar densidad y características clásticas a las que se encuentran en prototipo. En la Figura 3 se presenta la curva granulométrica del lecho en escala 1:65, a la cual llamaremos "curva ideal".

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Granulometría		
Escalada a modelo 1:65		
d_0	0.001	mm
d_{10}	0.006	mm
d_{16}	0.009	mm
d_{20}	0.017	mm
d_{25}	0.021	mm
d_{30}	0.046	mm
d_{35}	0.077	mm
d_{40}	0.108	mm
d_{50}	0.215	mm
d_{60}	0.369	mm
d_{60}	0.492	mm
d_{70}	0.586	mm
d_{75}	0.800	mm
d_{80}	1.000	mm
d_{84}	1.200	mm
d_{90}	1.893	mm
d_{95}	3.126	mm
d_{95}	4.689	mm
d_{100}	9.378	mm
σ_g	**11.40**	

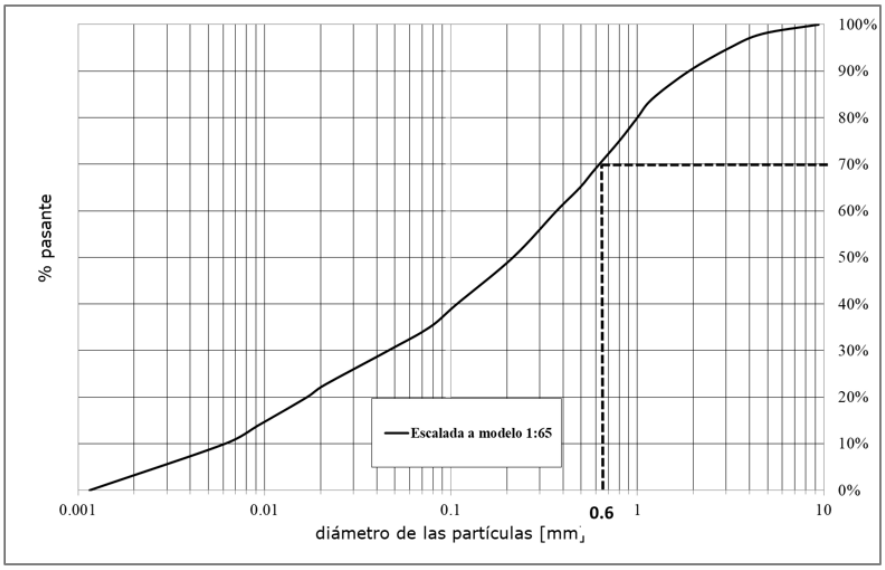


Figura 3. Curva granulométrica del prototipo escalada al modelo ("ideal").

Para pasar de la curva granulométrica "ideal" a la empleada en el modelo se tuvo en cuenta que:

1. El 35% inferior de la curva granulométrica "ideal" corresponde a sedimentos cohesivos (diámetros menores a 75 micrones), los cuales distorsionarían el funcionamiento del modelo, por lo cual la curva del modelo omite esta fracción.

2. Se adopta como diámetro mínimo de la granulometría del modelo 0.6 mm para evitar la generación de formas de fondo "parásitas" (rizos), que modificarían la rugosidad del cauce, distorsionando la similitud entre modelo y prototipo.

La escala de longitudes seleccionada (1:65) permite representar el tercio superior de la curva "ideal", la cual incluye los diámetros de la fracción gruesa de la curva. En la Tabla 1 se puede observar que la mayoría de las fórmulas empíricas utilizan como diámetros característicos esta fracción de la curva (d_{85}, d_{90} y d_{95}).

Tabla 1. Parámetros de la fórmula general de la ecuación de profundidad de erosión (ver citas * en Mason & Arumugam, 1985).

Fórmula núm.	Referencia	*K*	*x*	*y*	*Z*	*d*
1	Veronese - A (1937) *	1.9	0.54	0.225	0	
2	Damle – A (1966) *	0.652	0.5	0.5	0	

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Fórmula núm.	Referencia	*K*	*x*	*y*	*Z*	*d*
3	Damle - B (1966) *	0.543	0.5	0.5	0	
4	Damle - C (1966) *	0.362	0.5	0.5	0	
5	Chian Min Wu (1973) *	1.18	0.51	0.235	0	
6	Taraimovich (1978) *	0.633	0.67	0.25	0	
7	Machado - A (1982) *	2.98	0.5	0.25	0	
8	Sofrelec (1980) *	2.3	0.6	0.1	0	
9	INCYTH (1985)	1.413	0.5	0.25	0	
10	Martins - B (1975) *	1.5	0.6	0.1	0	
11	Lopardo (1987)	0.798	0.5	0.5	0	
12	Schoklitsch (1932) *	0.521	0.57	0.2	0.32	d_{90}
13	Veronese - B (1937) *	0.202	0.54	0.225	0.42	d_{50}
14	Egenberger (1943) *	1.44	0.6	0.5	0.4	d_{90}
15	Hartung (1959) *	1.4	0.64	0.36	0.32	d_{85}
16	Franke (1960) *	1.13	0.67	0.5	0.5	d_{90}
17	Kotoulas (1967) *	0.78	0.7	0.35	0.4	d_{90}
18	Zeller (1981) *	0.88	0.686	0.686	0.372	d_{95}
19	Chee y Padiyar (1969) *	2.126	0.67	0.18	0.063	d_{50}
20	Bisaz y Tschopp (1972) *	2.76	0.5	0.25	1	d_{90}
21	Chee y Kung (1971) *	1.663	0.6	0.2	0.1	d_{90}
22	Machado - B (1982) *	1.35	0.5	0.3145	0.0645	d_{90}

Selección del material granulometría del modelo

Esta tarea no es trivial y es crítica para la adecuada representación de los fenómenos erosivos en el prototipo. Se analizaron tres muestras diferentes (ver Figura 4):

a) Muestra 1. Arena fraccionada (diámetros entre 1 y 2 mm),

b) Muestra 2. Arena y grava (diámetros entre 0.6 y 12 mm),

c) Muestra 3. Arena fraccionada (diámetros entre 0.6 y 4mm).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

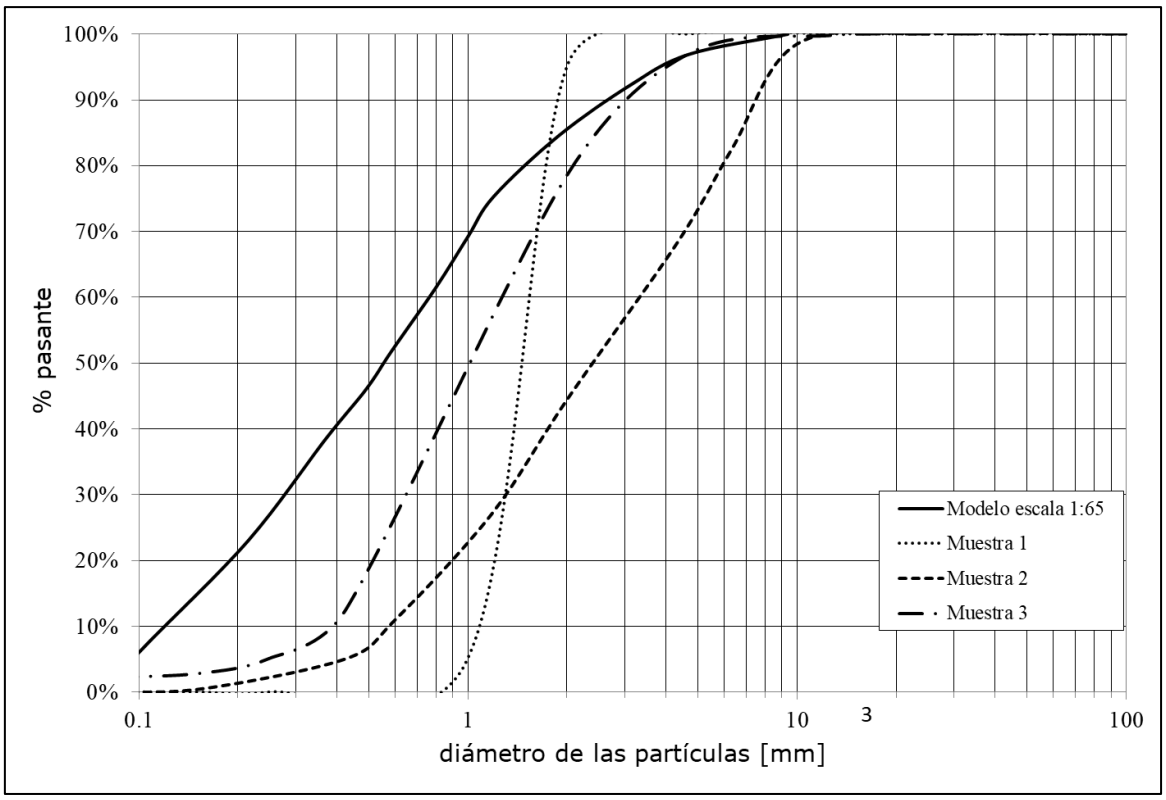


Figura 4. Comparación de la granulometría "ideal" y de las tres muestras (UNC, 2012).

En la curva "ideal" se observa que los diámetros característicos d_{85}-d_{95} se encuentran en el rango de 1.2 a 3.4 mm y que una fracción importante (mayor a 25%) de las tres muestras está entre tales límites; por esta razón, a priori se consideró que las tres muestras podrían ser aptas para reproducir el fenómeno de erosión local.

Para analizar cuál de las muestras es la más adecuada se efectuaron ensayos preliminares de calibración, para lo cual:

- Se espera que aguas abajo de la fosa de erosión se forme una "barra transversal" de sedimentos, con el material más grueso proveniente de la fosa.
- Se espera observar segregación de la granulometría sin alcanzar acorazamiento.

En esta serie de ensayos se observó que:

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Muestra 1: no se formó la barra de sedimentación aguas abajo de la fosa de erosión y la erosión continuó indefinidamente en el tiempo, es decir que el fenómeno erosivo no se estabilizó, lo cual no representa el fenómeno en el prototipo. Muestra descartada.

Muestra 2: se formó la barra de sedimentos y la erosión se estabilizó; sin embargo, se formó una coraza en el talud de aguas abajo del foso de erosión y en la barra de sedimentos con un diámetro medio de 8 a 12 mm, equivalente a 520-780 mm en prototipo; este material se encuentra en el lecho en forma aislada y por lo tanto no se encuentra en cantidad suficiente como para que se forme dicha coraza. Muestra descartada.

Muestra 3: se formó la barra de sedimentos y la erosión se estabilizó en un cierto tiempo, además se produjo una segregación de los sedimentos en el talud de aguas abajo y en la barra de sedimentos, con un diámetro medio de 4 mm, equivalente a 260 mm en prototipo (Figura 5). Muestra seleccionada para el modelo.

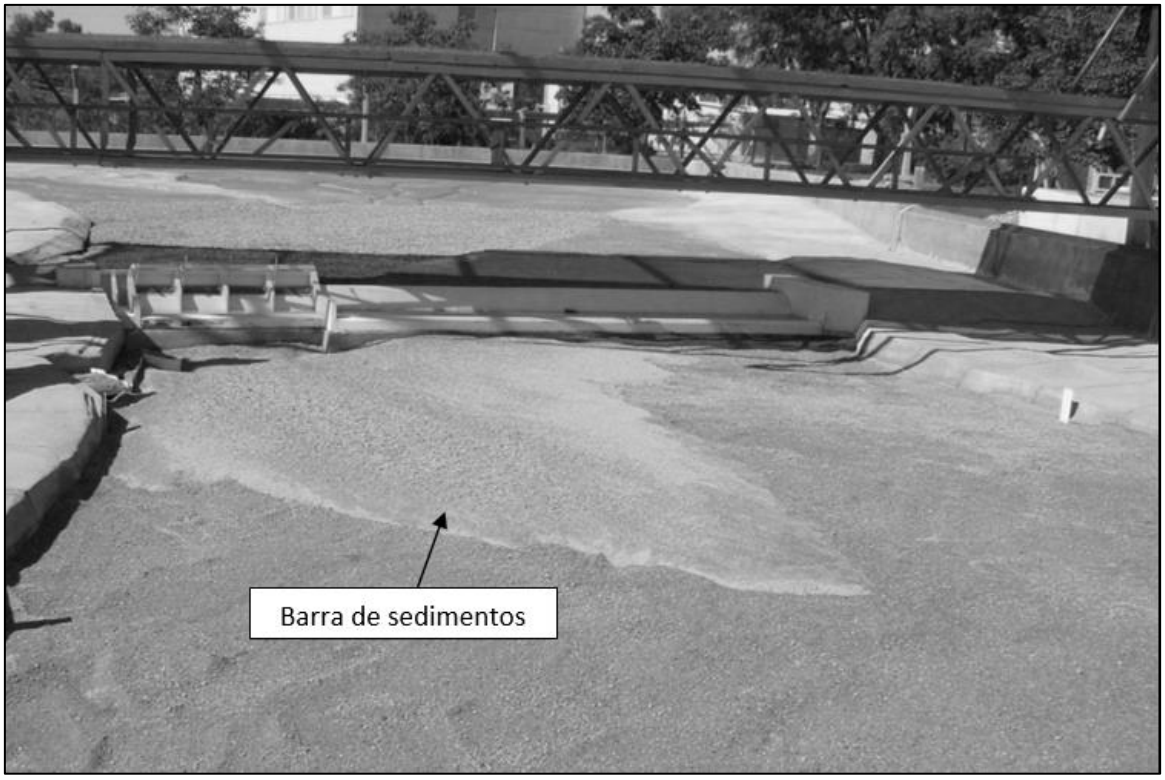


Figura 5. Barra de sedimentos aguas abajo del foso de erosión, muestra 3: $Q_{prototipo}$ = 900 m^3/s.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Se concluye que, para el caso analizado, la estabilización de la erosión depende de la formación de la barra de sedimentos, y la formación de la misma depende del transporte de sedimentos. Entonces, la fosa de erosión final es función tanto de las características hidráulicas como de los sedimentos y su distribución granulométrica. El hecho de que la erosión final es función de la curva granulométrica y de la formación de la barra de sedimento no está contemplado en ninguna de las formulaciones del estado del arte (Mason & Arumugam, 1985; Heng *et al*., 2013).

Condiciones hidráulicas modeladas

Se modelaron las siguientes condiciones:

Ensayo núm. 1. Caudal: 900 (m^3/s), escurriendo por canal modelador y dique móvil.

Ensayo núm. 2. Caudal: 3 200 (m^3/s), escurriendo por dique fijo.

Ensayo núm. 3. Caudal: 4 200 (m^3/s), escurriendo por canal modelador, dique móvil y dique fijo.

Ensayo núm. 4. Caudal: 1 600 (m^3/s), escurriendo por canal modelador, dique móvil y dique fijo.

Ensayo núm. 5. Caudal: 600 (m^3/s), escurriendo por canal modelador y dique móvil.

Metodología experimental

Las erosiones fueron relevadas, utilizando un nivel óptico, en tres perfiles paralelos a la estructura (perpendicular al flujo), cubriendo toda la fosa de erosión. El perfil 1, medido al pie de la presa; el perfil 2, en el fondo del foso de erosión; y el perfil 3, coincidente con la barra de sedimentos.

Por otro lado, se midió la superficie del cauce erosionado (fosa de erosión, Figura 6a) mediante una cámara digital (Microsoft, 2010) que

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

permite la adquisición de información planialtimétrica con alta resolución espacial. Con esta información se generó un ráster de profundidades, conformando un modelo digital del terreno (MDT, Figura 6b). Los detalles metodológicos pueden verse en Pagot *et al*., 2014.

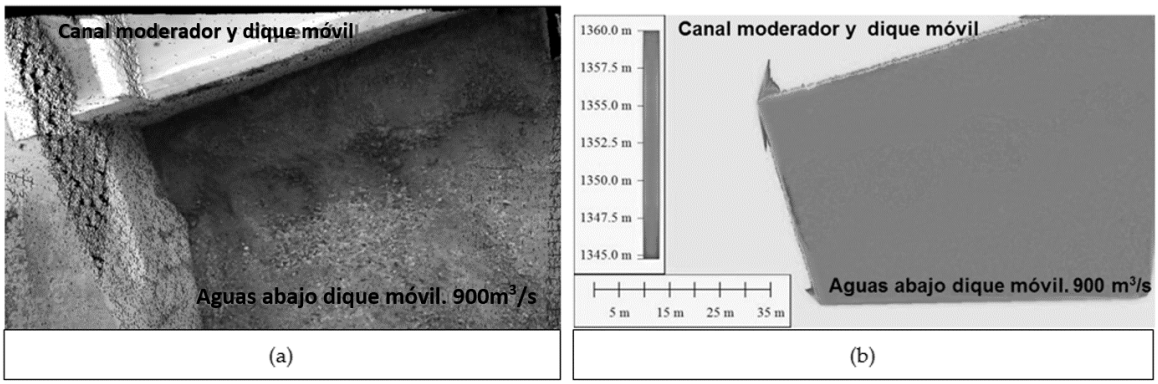


Figura 6. (a) Imagen óptica del foso de erosión aguas abajo del dique móvil mediante Kinect, y (b) modelo digital del terreno.

Esta técnica de relevamiento tiene la ventaja de no alterar los resultados de los ensayos, pues permite adquirirlos en forma remota y con alta resolución espacial.

Para garantizar que la fosa de erosión llegue a un estado de cuasi equilibrio dinámico se realizó un monitoreo de las erosiones durante la ejecución de los ensayos en 12 puntos de control. Estas mediciones se realizaron cada 15 minutos hasta los primeros 90 minutos del ensayo y luego cada 30 minutos hasta que se alcanzó la estabilización de las erosiones. Se consideró que se llega a este estado de equilibrio cuando no se observen cambios significativos entre tres mediciones consecutivas.

A fin de evaluar la localización de las zonas de máxima velocidad y la distribución transversal del flujo se midieron las velocidades de ingreso a las estructuras mediante la técnica PTV (velocimetría por seguimiento de partículas). La aplicación de la técnica de velocimetría por seguimiento de partículas permite obtener los campos instantáneos y medios de velocidades, las líneas de trayectorias y líneas de trayectorias medias. Para el análisis de las imágenes se utilizó el *software* denominado *PTVLab* (Patalano, 2017).

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Estimaciones empíricas de la máxima profundidad de erosión (h_s)

Existen numerosas investigaciones que presentan formulaciones de tipo semiempíricas que permiten determinar la máxima profundidad de erosión sobre la base de consideraciones energéticas del escurrimiento y de las características del material del lecho (representadas por un diámetro característico).

A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas en este trabajo para determinar la máxima profundidad de erosión. Estas ecuaciones se clasificaron en tres grupos, según los parámetros que intervienen en cada una de ellas:

Grupo I. Expresa la profundidad máxima de erosión (h_s) en términos de la diferencia de energía entre aguas arriba y aguas abajo (H), el caudal específico del chorro (q) y el diámetro característico del material del lecho (d).

La fórmula general que toma este grupo de ecuaciones es:

$$h_s = K \frac{q^x H^y}{d^z}$$

Donde K, x, y, z son coeficientes y exponente que fueron calibrados por diferentes autores. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 1 se presentan los valores de dichos coeficientes propuestos por cada autor.

Se puede observar que desde la fórmula 1 hasta la 11, el exponente del diámetro característico es $z = 0$, es decir que estas expresiones no consideran al diámetro de los sedimentos para determinar la máxima profundidad de erosión.

Dentro de este grupo se incluye la fórmula propuesta por el IDIH:

Fórmula 23 – IDIH (1990): $h_s = 2.6662\, q\, H^{-0.5} + 0.3291H$

Grupo II. Las ecuaciones contemplan, además de las variables q, H y d, la altura del colchón de agua (h_r) en el punto de impacto:

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Fórmula 24- Jaeger (1939): $h_s = 0.6\, q^{0.50} H^{0.25} \left(\frac{h_r}{d^z}\right)^{0.333}$

Fórmula 25 - Martins – A (1973): $h_s = 0.14\, N - 0.73\, \frac{h_r^2}{N} + 1.7\, h_r$

donde: $N = 7\sqrt{\frac{\mathrm{Q}^3 H^{1.5}}{d^2}}$

Aquí se puede sustituir *Q* por *q* debido a que se asume que esta expresión puede ser aplicable para grandes láminas de flujo.

Fórmula 26 - Mason (1984): $h_s = 1.65\, \frac{q^{0.60} H^{0.05} h_r^{0.15}}{d^{0.10}}$

Grupo III. Estas ecuaciones consideran también el ángulo con el cual incide el chorro sobre el colchón de agua (β).

Fórmula 27 - Mikhalev (1960): $h_s = \frac{1.804\, q\, \sin\beta}{(1-0.215\cot\beta)} \left(\frac{1}{\mathrm{d}_{90}^{0.33}.h_r^{0.50}} - \frac{1.126}{H}\right)$

Fórmula 28- Rubinstein (1963):

$$h_s = h_{CA} + 0.19 \left(\frac{\mathrm{H}+\mathrm{h_r}}{\mathrm{d_{90}}}\right)^{0.75} \left(\frac{\mathrm{q}^{1.20}}{\mathrm{H}^{0.47}.\mathrm{h_r^{0.33}}}\right)$$

Fórmula 29 - Mirskhulava – (1967): $h_s = \left(\frac{0.97}{\sqrt{\mathrm{d_{90}}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}}\right) \frac{q\, \sin\beta}{1-0.175\, \cot\beta} + 0.25 h_r$

Las 29 fórmulas consideradas son de carácter semiempírico y se calibraron a partir de datos experimentales obtenidos de modelos físicos o de valores de erosión observados en prototipo.

Para estimar los caudales específicos (*q*) que eroga cada una de las estructuras de descarga se utilizaron las curvas *H* - *Q*, correspondientes a cada estructura, y se consideró que el caudal se distribuye en forma uniforme en todo el ancho de la estructura.

Para determinar la altura de energía (*H*) se consideró, además del desnivel geométrico que existe entre el nivel aguas arriba y el de restitución, la carga de velocidad en la sección en la cual se realizó la medición de los niveles:

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

$$H = H_G + \frac{{V_m}^2}{(2 \times g)}$$

Donde:

H_G: desnivel geométrico entre el nivel aguas arriba y en nivel de restitución.

V_m: velocidad media en la sección aguas arriba.

Para asignar valores a los diámetros característicos que intervienen en las fórmulas se utilizó la curva granulométrica del lecho (d_{95} = 0.130 m; d_{90} = 0.123 m; d_{85} = 0.116 m, y d_{50} = 0.068 m).

Resultados

Estudios experimentales

Se graficó la máxima profundidad de erosión (h_s) *versus* las dos variables que aparecen en todas las formulaciones empíricas: el caudal específico q y la altura de energía H.

A priori se espera que a medida que aumenta el caudal específico (q) y la altura de energía (H), la máxima profundidad de erosión (h_s) también se incremente (Heng *et al*., 2013; Ahmed-Amin, 2015). Sin embargo, al observar la Figura 9 y Figura 10, en las cuales se grafican las relaciones q-h_s y H-h_s, se observó un comportamiento diferente al esperado en el canal moderador y el dique móvil.

En la Figura 9 se puede observar que en el dique móvil las erosiones máximas (h_s) no presentaron cambios significativos entre los caudales de 13.4 y 16.2 m^2/s, y en el canal moderador se observó una erosión de 15 m para un caudal de 18 m^2/s y una erosión de 14 m para un caudal de 19.7 m^2/s.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

En la Figura 10 se observó un comportamiento anómalo entre las alturas *H* de 12.4 m y 13.6 m, es decir que al aumentar *H* no se observaron incrementos en las erosiones máximas.

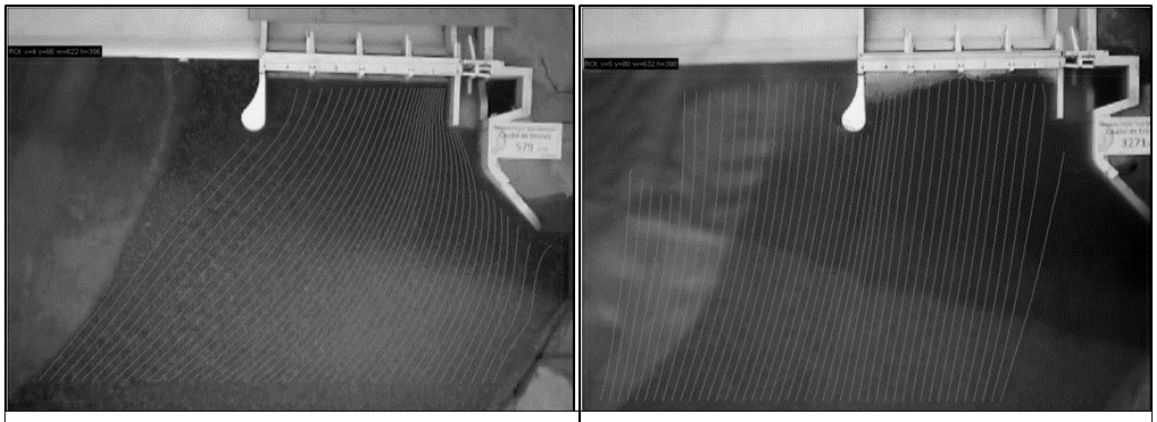
Para explicar estos comportamientos se plantearon dos hipótesis:

Hipótesis 1. El comportamiento anómalo se produce por un cambio en la dirección del flujo aguas arriba de las estructuras. En los ensayos realizados se observó un cambio en la dirección del flujo cuando el agua comienza a escurrir por el dique fijo.

Hipótesis 2. El comportamiento observado en la Figura 9 y Figura 10 se debe a un cambio en las relaciones *H* - *Q* del canal moderador y del dique fijo. Cuando el nivel del agua supera la altura de las compuertas, las mismas comienzan a funcionar como orificio, por lo cual cambian las relaciones *H* - *Q*.

Flujo de aproximación

Aplicando la técnica PTV (Patalano, 2017) se observó que cuando el agua escurre únicamente por el dique móvil y el canal moderador, el flujo ingresa a dichas estructuras en forma oblicua (ver líneas de trayectorias medias en la Figura 7a), y cuando el agua comienza a escurrir por el dique fijo, el flujo ingresa a las estructuras en forma perpendicular al eje de la presa (Figura 7b).



(a) (b)

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Figura 7. Líneas de trayectorias medias aguas arriba de las estructuras: (a) escurriendo sólo por el dique móvil y canal moderador; (b) escurriendo por las tres estructuras.

Curvas de descarga

Para analizar la ley de descarga de las estructuras se obtuvieron sus curvas altura-caudal (*H* – *Q*). El ajuste se realizó con datos experimentales obtenidos del modelo físico para cada una de las estructuras. En la Figura 8a se presenta la curva de descarga del dique móvil y en la Figura 8b la del canal moderador. Se puede observar que el dique móvil comienza a trabajar como orificio cuando la altura sobre la cresta es de aproximadamente 5.4 m y el canal moderador para una altura de 6 m.

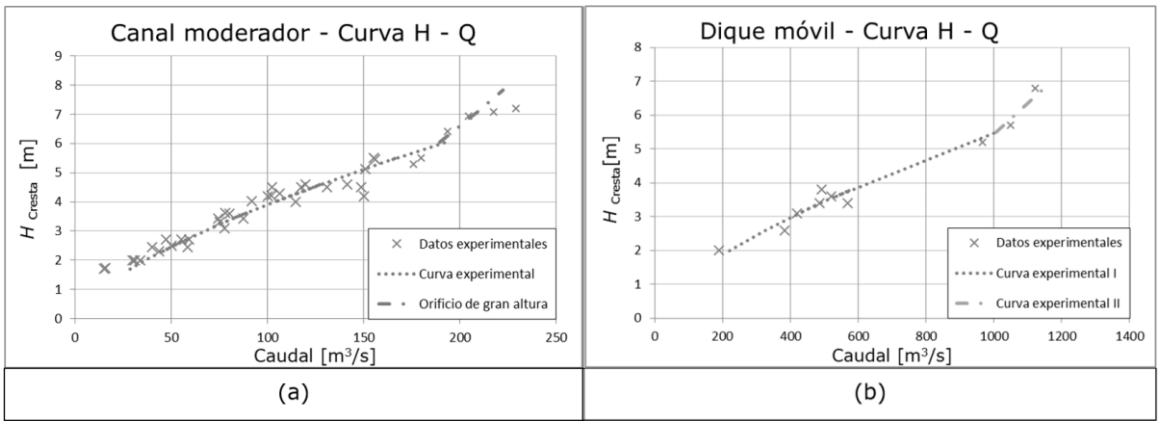


Figura 8. Curva de descarga (*H*-*Q*) del dique móvil (a) y canal moderador (b).

En la Figura 9 se presenta en línea de trazos el caudal específico correspondiente a la hipótesis 1 y en línea continua el correspondiente a la hipótesis 2. Se observa que el cambio en la dirección del flujo aguas arriba de las estructuras (hipótesis 1) no tiene una influencia significativa en el comportamiento "anómalo" de las relaciones q-h_s y que el caudal específico correspondiente a la hipótesis 2 (cambio en las relaciones *H*-*Q*) para las dos estructuras se encuentra en el rango de caudales en los cuales se observó un comportamiento diferente al esperado.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Entonces, se concluye que el comportamiento "anómalo" observado en las relaciones q-h_s puede explicarse por el cambio en las relaciones H-Q.

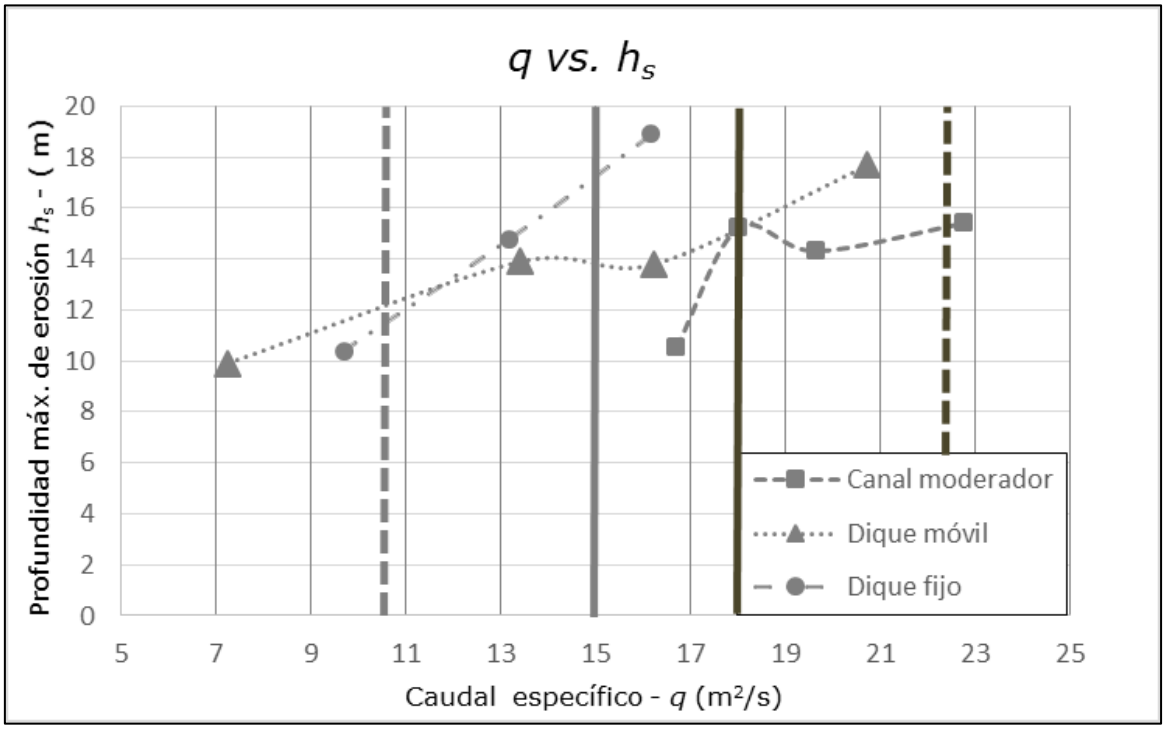


Figura 9. Relación experimental q-h_s para en CM, DM y DF.

En la Figura 10 se observa que el cambio en las relaciones h_s-H se da entre valores de H de 12.4 y 13.6 m para ambas estructuras. El valor de este parámetro para la hipótesis 1 es de 12.3 m tanto para el canal moderador como para el dique móvil y para la hipótesis 2 es de 11.8 m y 13 m, respectivamente.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

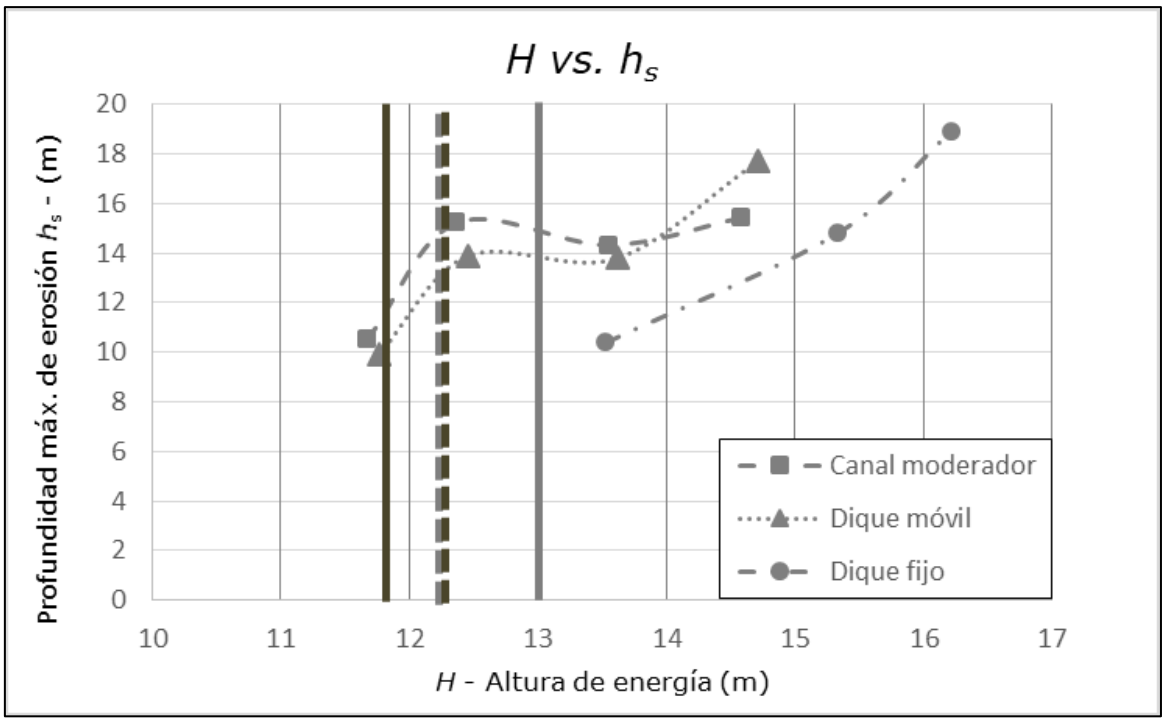


Figura 10. Relación experimental H-h_s para CM, DM y DF.

Estimaciones empíricas

Los valores de erosión (h_s) obtenidos de aplicar las 29 fórmulas empíricas mostraron gran dispersión en los resultados. El valor de desvío estándar es de un 50% del valor medio de las 29 fórmulas.

A continuación se comparan los resultados experimentales con las estimaciones empíricas.

En la Figura 11 se presentan los diagramas de dispersión de h_s experimental frente a h_s estimado para el canal moderador, dique móvil y dique fijo, respectivamente. Se observó que ninguna fórmula funcionó de manera satisfactoria para las tres estructuras.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

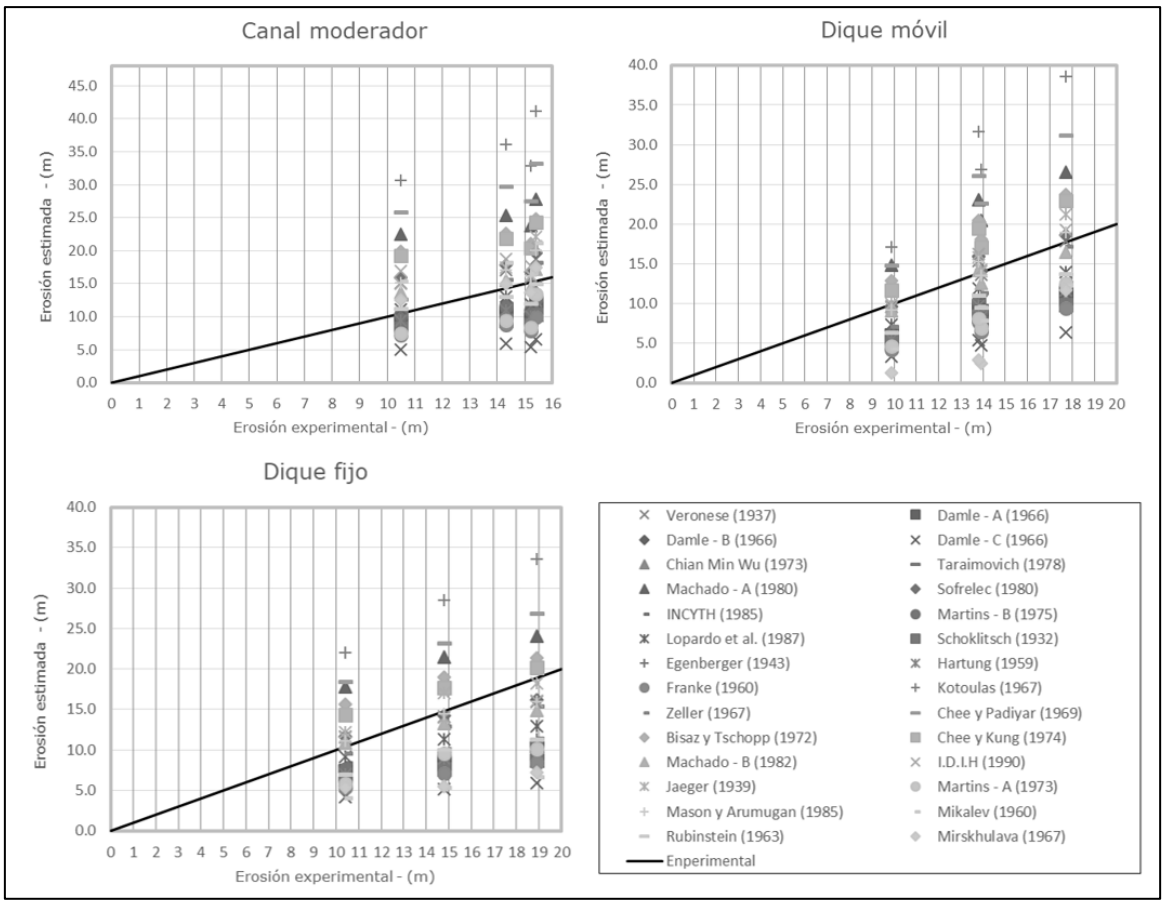


Figura 11. Diagrama de comparación entre las erosiones experimentales y las estimaciones empíricas: a) canal moderador, b) dique móvil y c) dique fijo.

En la Figura 12 se muestra un gráfico Box-Plot, en el cual se presentan los resultados para las tres estructuras. Se puede observar que el resultado experimental para el canal moderador se encuentra próximo al segundo cuartil (Q2), y que los valores experimentales correspondientes al dique móvil y el dique fijo se ubican próximos al tercer cuartil (Q3). Se concluye que la máxima profundidad de erosión no sólo varía con las condiciones sedimentológicas, las cuales en este caso permanecen constantes para las tres estructuras, sino también de la hidráulica de cada obra en particular.

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

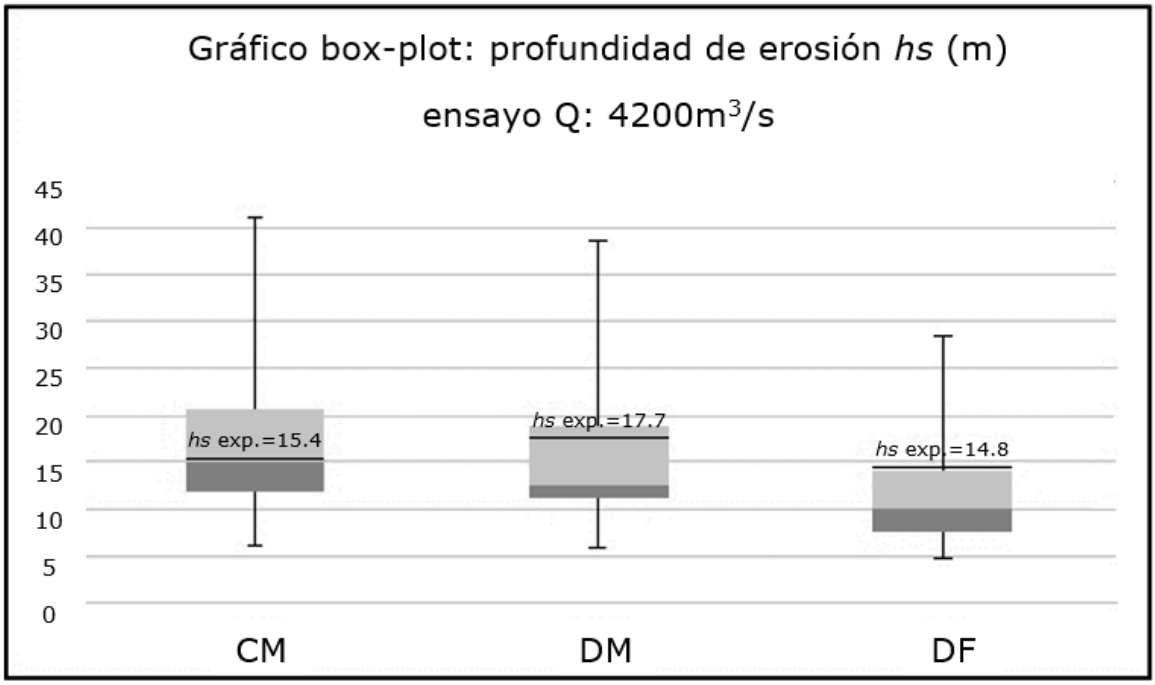


Figura 12. Gráfico *Box-Plot* del canal moderador, dique móvil y dique fijo para un caudal de 4 200 m^3/s.

En la

Tabla **2** se presenta las diferencias relativas porcentuales entre las máximas erosiones medidas en el modelo físico y las estimadas con las diferentes formulaciones empíricas para cada una de las estructuras y cada uno de los escenarios ensayados. Las fórmulas que mejor se adaptaron a las condiciones ensayadas para las tres estructuras de descarga fueron las propuestas por Zeller (1981) y Machado (1982). Las que mejor se adaptaron a las mediciones experimentales realizadas en el canal moderador fueron Rubinstein (1963), Lopardo (1987), Mirskhulava (1967), Zeller (1981), Machado (1982) e INCYTH (1985); para el dique móvil, Veronese (1937), Sofrelec (1980), Machado (1982), Mason y Arumugam (1985), IDIH (1990), Jaeger (1939) y Zeller (1981); para el dique fijo, Machado (1982), Veronese (1937), Zeller (1981), Mason y Arumugam (1985), y Sofrelec (1980).

Tabla 2. Diferencia relativas porcentuales entre las estimaciones empíricas y erosión experimental para el CM, DM y DF.

	Canal moderador				**Dique móvil**				**Dique fijo**		
Caudal total (m^3/s)	600	900	1 600	4 200	600	900	1 600	4 200	1 600	4 200	3 200
Erosión experimental	10.5	15.2	14.3	15.4	9.9	13.9	13.8	17.7	10.4	14.8	18.9

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

h_s (m)												
Fórmula		**Diferencia relativa porcentual respecto a la erosión experimental (%)**										
1	Veronese (1937)	44	5	19	22	-3	-2	12	1	12	-4	-15
2	Damle - A (1966)	-13	-36	-26	-23	-39	-39	-30	-36	-28	-37	-44
3	Damle - B (1966)	-28	-47	-38	-36	-49	-50	-42	-46	-40	-48	-53
4	Damle - C (1966)	-52	-64	-59	-57	-66	-66	-61	-64	-60	-65	-69
5	Chian Min Wu (1973)	-16	-39	-30	-29	-42	-42	-35	-41	-33	-44	-50
6	Taraimovich (1978)	-26	-46	-37	-35	-55	-51	-43	-47	-47	-52	-57
7	Machado - A (1982)	114	56	77	81	50	47	67	50	71	45	27
8	Sofrelec (1980)	52	10	25	27	-2	1	15	5	12	-4	-15
9	INCYTH (1985)	2	-26	-16	-14	-29	-30	-21	-29	-19	-31	-40
10	Martins - B (1975)	-1	-28	-19	-17	-36	-34	-25	-32	-27	-37	-44
11	Lopardo *et al*. (1987)	6	-22	-9	-6	-26	-26	-14	-21	-12	-23	-32
12	Schoklitsch (1932)	-21	-42	-34	-33	-48	-47	-39	-45	-40	-48	-54
13	Veronese (1937)	-53	-66	-61	-60	-68	-68	-63	-67	-63	-69	-72
14	Egenberger (1943)	-7	-31	-19	-15	-40	-36	-25	-30	-27	-34	-40
15	Hartung (1959)	-11	-34	-23	-20	-44	-40	-30	-34	-33	-40	-45
16	Franke (1960)	-31	-48	-39	-35	-58	-53	-44	-47	-48	-52	-56
17	Kotoulas (1967)	191	117	153	167	73	93	129	118	111	93	78
18	Zeller (1981)	20	-9	9	18	-28	-18	0	-3	-8	-13	-18
19	Chee y Padiyar (1969)	147	81	108	116	50	63	89	76	78	57	42
20	Bisaz y Tschopp (1972)	90	39	58	61	30	30	48	34	50	28	13
21	Chee y Kung (1971)	83	34	53	58	18	23	41	30	38	19	7
22	Machado - B (1982)	30	-5	9	11	-9	-10	3	-7	5	-10	-21
23	I.D.I.H (1990)	61	17	31	35	-4	2	17	9	10	-5	-15
24	Jaeger (1939)	43	7	22	44	0	1	15	20	17	15	-4
25	Martins - A (1973)	-28	-45	-35	-13	-54	-51	-41	-29	-44	-35	-47
26	Mason y Arumugam (1985)	45	6	19	30	-7	-3	10	7	7	-2	-15
27	Mikalev (1960)	47	9	27	37	-57	-43	-31	-31	-61	-63	-65
28	Rubinstein (1963)	7	-21	-9	-3	-35	-32	-20	-22	-33	-32	-40
29	Mirskhulava (1967)	20	-10	5	13	-87	-83	-79	-34	-49	-63	-62

Finalmente, se comparan los resultados experimentales observados en este estudio con resultados presentados en casos similares. Para lo cual se utilizó el gráfico exhibido por Lopardo (2005), en el cual se relacionan las variables consideradas en un gráfico adimensionalizando. En la Figura 13 se presenta dicho gráfico, en el cual se grafican las curvas correspondientes a la expresión propuesta por INCYTH, puntos experimentales de erosiones en obras prototipo

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

(Ptos exp.), la envolvente dada por la expresión de diseño propuesta por Lopardo y los resultados obtenidos en este trabajo para cada una de las estructuras.

Se observa que los puntos medidos en este trabajo se encuentran próximos a la envolvente propuesta por Lopardo y, en algunos casos, h_s/H es superior.

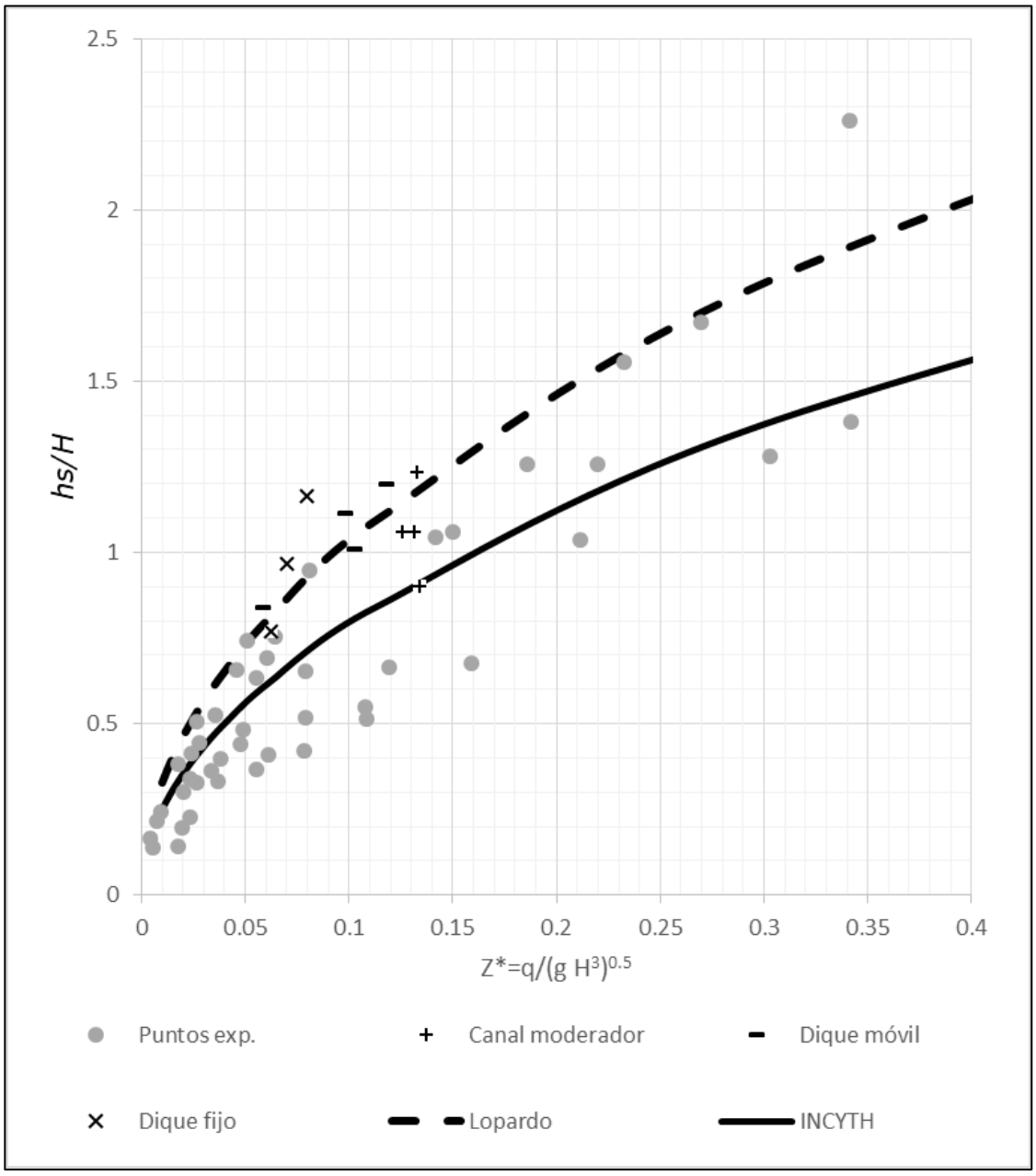


Figura 13. Gráfico adimensional de las variables consideradas.

Tecnología y ciencias del agua, 10(3), 70-95. DOI: 10.24850/j-tyca-2019-03-04

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Conclusiones

En la etapa de calibración "Selección del material granular del fondo móvil" se observó que las erosiones dependen de la formación de la barra de sedimentos aguas abajo de la fosa de erosión, y la formación de la barra depende de los diámetros característicos de las partículas y de la curva granulométrica.

Al impactar el chorro de agua en el cauce se genera gran disipación de energía macro-turbulenta, que da inicio al proceso de erosión local. El material del fondo es removido, puesto en suspensión y transportado hacia aguas abajo, donde el flujo reduce su energía y, por lo tanto, su capacidad de transporte. Finalmente, se produce la sedimentación de las partículas de mayor tamaño y esto da inicio a la formación de la barra de sedimentos.

La formación de la barra contribuye a estabilizar las erosiones, alcanzando profundidades menores a las que se producirían sin la formación de la barra de sedimentos debido a dos efectos:

- Incrementa el nivel de restitución en la zona de disipación de energía. Esto reduce el valor de H y aumenta el tirante del colchón de agua h_r en la zona de impacto.
- Eleva el nivel del cauce aguas abajo de la fosa de erosión. Por lo tanto, para que los sedimentos sean expulsados de la fosa de erosión, éstos se deben elevar a mayor altura.

En cuanto al "análisis de los resultados experimentales", se concluye que para estructuras de descarga de baja altura y reguladas por compuertas, las relaciones entre q y H con la profundidad máxima de erosión (h_s) varían con la ley de descarga (H-Q) de las estructuras.

Al calcular las erosiones (h_s) con "fórmulas empíricas", se observó una gran dispersión en los resultados. La aplicación de estas fórmulas debe acotarse a estimaciones preliminares, cuyo fin es obtener un orden de magnitud de las potenciales erosiones.

Para el caso particular en el cual se utilicen sólo expresiones empíricas, se deben aplicar aquellas fórmulas que hayan sido calibradas para condiciones hidráulicas y sedimentológicas similares a las del caso

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

analizado. En este estudio, las fórmulas que mejor comportamiento demostraron para las condiciones ensayadas son las de Zeller (1981) y Machado (1982).

Referencias

Ahmed-Amin, A. M. (2015). Physical model study for mitigating local scour downstream of clear over-fall weirs. *Ain Shams Engineering Journal* (Egypt), 6, 1143-1150.

Farias, H. D. (2005). Geometría hidráulica de ríos de llanura. Enfoques analíticos considerando la influencia de las márgenes (CD-ROM). *Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos*, Neuquén, Argentina.

Fuentes, R. (2002). *Modelos hidráulicos: teoría y diseño*. Santiago, Chile.

Google. (2012) *Google Earth* [website]. Recuperado de http://earth.google.com/

Heng, T., Tingsanchali, T., & Suetsugi, T. (2013). Prediction formulas of maximum scour depth and impact location of a local scour hole below a chute spillway with a flip bucket, *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 172 (River Basin Management VII), 251-262.

Lopardo, R. (2005). *Erosión local aguas debajo de estructuras hidráulicas*. Curso sobre hidráulica experimental aplicada a estructuras. Ciudad Real, España.

Mason, P., & Arumugam K. (1985). Free jet scour below dams and flip buckets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(2), 220-235.

Microsoft. (2010). *Kinect*. Recuperado de http://idav.ucdavis.edu/~okreylos/ResDev/Kinect/index.html

Pagot, M., Sánchez-Aimar, E., Vaca, P., Nellino, N., Guillén, N., Hillman, G., & Rodríguez, A. (2014). Técnica digital para medición de erosión en modelos físicos. *Revista Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* (UNC), 1(2), 35-40.

Patalano, A., García, C. M., y Rodríguez, A. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers & Geosciences*, 109, 323–330. DOI: 10.1016/j.cageo.2017.07.009

UNC, Universidad Nacional de Córdoba. (2012). *Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador*

2019, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Open Access bajo la licencia CC BY-NC-SA 4.0
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Los Molinos, provincia de Jujuy. (Informe Técnico). Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba.