Revista NTHE, 24: 59-65, 2018
ISSN: 2007-9079
http://www.nthe.concyteq.edu.mx/

Instrumentación para conocer la evolución de los hidrogramas en el rompimiento de presas a través de modelación hidráulica en laboratorio

Mario A. Jurado Hernández[1] y Juan Ramón Novelo[2]

Resumen

Obtener los hidrogramas de salida provocados por el rompimiento de presas es de gran ayuda para evaluar los riesgos que se puedan presentar aguas abajo de las mismas. Se realizaron modelaciones en laboratorio simulando el rompimiento de presas de diferente material granular, éstas fueron apoyadas con instrumentación para medir los tirantes de agua después de la presa y obtener el caudal pico en el escurrimiento de salida. Se utilizaron sensores de nivel (ultrasónicos) para medir estos tirantes después de los rompimientos a partir de las brechas de las presas. La que fue construida con material de menor diámetro presenta menores deformaciones en su brecha, y el hidrograma de salida fue el de menor caudal pico y menor volumen desalojado. Las propiedades del material son importantes para la evolución de la brecha lo que tiene gran influencia en el hidrograma de salida, si la brecha final es pequeña, menor volumen y material son desalojados; mayores dimensiones en la brecha, después del rompimiento, generan mayor transporte de material de la presa y el caudal pico es mayor.

Palabras clave: hidrograma de salida, sensores de nivel, rompimiento de presas.

Abstract

Obtain the outflow hydrographs induced by dam breaks is very helpful to evaluate the risks that could appear downstream the construction. Laboratory simulations were carried out simulating the dam breaks of different granular materials with instrumentation to measure the water level after the dam and obtain the peak discharge at the outflow. Level sensors (ultrasonic) were used to measure these heights, water, after the breaks by the evolution of dam breach. The dam built with material with less size shows less deformations on its breach, and the outflow hydrograph was the one with less peak discharge and less volume discharged. Material properties are important for the breach evolution which has big influence on the outflow hydrograph, if the final breach is tiny, less volume and material are carried; bigger dimensions on the breach, after the break, produce major dam-material transport and the peak discharge is bigger.

***Key words**: outflow hydrograph, level sensors, dam breaks.*

[1]mario_jurado23@hotmail.com
[2]nor.nor13@yahoo.com.mx
[1 y 2] Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro

Fecha de recepción: 28 de septiembre de 2018
Fecha de aceptación: 05 de diciembre de 2018

1. Introducción

En las últimas décadas, se han analizado las condiciones en que las presas alrededor del mundo han fallado (Hervouet, 2000; Pilotti *et al*., 2014; Zhong *et al*., 2018; Wang *et al*., 2018; Burritt y Christ, 2018) y las que podrían fallar (Fuentes *et al*., 2010; Arganis *et al*., 2009; Gabriel-Martin *et al*., 2017). La modelación en computadora de estos rompimientos es útil para predecir las zonas de inundación y los hidrogramas que se podrían presentar (Hervouet, 2000; Arganis *et al*., 2009; Pilotti *et al*., 2014; Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2012 y 2015).

Hervouet (2000) describió el incidente más conocido en cuanto a la falla de una presa, Malpasset (arco de 223 m de cresta, espesor variable de 1.55 a 6.77 m y altura máxima de 66.5 m), que ocurrió en diciembre de 1959 cerca de la Riviera Francesa. A raíz de este incidente nuevas normativas para los estudios de diseño de presas se establecieron en este país, incluyendo simulaciones en computadora; por ello, la mayoría de las siguientes construcciones de presas contenían las simulaciones unidimensionales, pero después de 1994 se requirió hacer estudios en 2-D. Un *software* utilizado para ello es el TELEMAC-2D con el cual se ejemplificó el caso de falla de la presa de Malpasset con una base de datos topográficos muy completa, así como estaciones a lo largo del río que determinaron los tiempos en que el agua recorrió 25 km del valle. La única problemática de las simulaciones, con este programa, es que no cuenta con cuantificación de escombros ni transporte de sedimentos.

Un método para calcular el hidrograma de salida, debido a la ruptura de una presa (como caso de estudio La Parota, Gro), emplea la curva de elevaciones y capacidades del embalse y las dimensiones que pudiese tomar la brecha. Estas características se introducen a un programa para hacer más fácil el cálculo. Los hidrogramas que se obtuvieron se analizaron para tres casos en los que el tiempo de descarga era la variable. Si ésta ocurre en tiempo relativamente rápido, el caudal pico sería muy grande al momento de transitarlo por el río aguas abajo del embalse; por el contrario, si el vaso se vacía en un periodo más prolongado, dicho caudal se reduce considerablemente (Fuentes *et al*., 2010). Este estudio se hizo para determinar el tiempo base de los hidrogramas y establecer un rango para alertar las zonas aguas abajo de la cortina.

El programa CARPA fue utilizado en la modelación bidimensional para evaluar los tirantes y las velocidades máximas en caso de que la presa La Parota sufriera una ruptura de su cortina. Con estos análisis, se establecen las zonas de riesgo por inundación debido a la cantidad de volumen que se drenaría en esta catástrofe que podría llegar a velocidades de 18 m/s (65 km/h) y alturas de hasta 52 m. Lo anterior podría afectar a 36 poblados en el recorrido del río Papagayo (Arganis *et al*., 2009).

Se simuló el rompimiento de la presa Cancano, al norte de Italia, con el programa FLO 2D (con el empleo de MDE de 20 x 20 m). Este se usó por su aplicación en simulaciones de flujo con escombro. Para ello, se ocuparon cuatro resoluciones de malla para medir los hidrogramas a la falla en dos zonas en la parte media y baja del valle. Se compararon las zonas de inundación por modelos 1D, 2D contra los datos históricos obtenidos del reporte de De Marchi en 1945 (Pilotti *et al*., 2014).

La modelación en laboratorio permite observar los fenómenos hidráulicos e hidrológicos en condiciones controladas. El simular rompimientos de presas y evoluciones de brechas en estas condiciones es de gran ayuda por la accesibilidad de tomar medidas, capturar fotos y videos (Balmforth *et al*., 2008; Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2012; Kocaman y

Ozmen-Cagatay, 2015; Islam, 2015; Stolle *et al*., 2018).

En Canadá, se hicieron pruebas en el laboratorio para determinar cómo el oleaje inducido en un embalse y el exceso en la capacidad de almacenamiento pueden provocar la falla de una cortina de material granular acompañado de un análisis teórico que desarrolla las ecuaciones de Saint-Venant. Las simulaciones se hicieron en un canal de 30 cm de ancho y 125 cm de largo; la cortina tenía una altura de 10-15 cm y largo de 30-40 cm. Determinaron que las ondas que se producen por oleaje no son significativas en la destrucción de una presa; la causa por la que pueden fallar más fácilmente es por el rebase del agua sobre la cresta de la cortina lo que provoca que el material se humedezca y la arena pierda su esfuerzo estructural, con lo que se forman brechas en la cara aguas abajo de la presa y, conforme el embalse drena, éstas van aumentando (Balmforth *et al*., 2008).

En un canal de 8.9 m largo, 0.3 m de ancho y alto de vidrio, se hizo la modelación del rompimiento de una presa (Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2012) en la Universidad de Cukurova en Turquía; se le indujo una onda de agua a un muro vertical que simulaba una presa (Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2015). En ambas pruebas, se midieron los hidrogramas en seis puntos usando una técnica de procesamiento de imágenes para detectar los niveles del agua que contenía un colorante; después, se compararon con los obtenidos en el programa FLOW-3D con la extensión RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*), en el que se visualizó una similitud alta en los valores provocados por estas ondas.

En un canal de concreto de 20 m de largo, 2.2 m ancho y 1 m de alto en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad de Nagoya, Japón, se construyeron, de material granular, los taludes de un río con una brecha; además, se evaluó, experimental y en computadora, la evolución de la brecha conforme el nivel del río había sido rebasado y los niveles del tirante en las zonas aledañas al río. Las zonas de inundación y la brecha fueron más grandes con materiales grandes (grava y arena) que con materiales finos (Islam, 2015).

Para las simulaciones en el canal de alta descarga (14 m de largo, 0.4 m de ancho y 0.8 m de alto hecho de acero), se introdujeron tres tipos de “escombros” de madera en la zona de almacenamiento y se colocó instrumentación para conocer la fuerza y velocidad que inducían los mismos; además, se abrió la compuerta para conocer las condiciones que cada tipo de escombro presentaba en flujo supercrítico (Stolle *et al*., 2018).

A través de análisis de registros históricos se pueden calcular varios parámetros en las presas. Por ejemplo, en la de Riaño, en el norte de España (582 km^2), se calcularon los niveles iniciales del embalse para distintos escenarios; los caudales de llegada hacia el embalse, los casos en los que podrían fallar sus compuertas, los niveles máximos de agua probabilísticos en la presa y los caudales de salida. Con una muestra de 100,000 datos, se calcularon los hidrogramas de salida y los niveles de la presa a periodos de retorno entre 500 y 10,000 años con los métodos de Ven Te Chow y el de Evaluación Volumétrica. Se obtuvieron curvas de máximos caudales de salida y de los niveles máximos de agua en este embalse, en específico cuando no hay falla de las compuertas, la falla de una y la falla de ambas (Gabriel-Martin *et al*., 2017).

Al hacer la recolección de las características más importantes a partir de la falla de una presa (e.g. tipo de falla, volumen de agua en el punto bajo de la brecha, tirante en la brecha, altura de la brecha, longitud del embalse, ancho promedio del embalse y gasto pico medido), se pueden hacer comparaciones del gasto pico calculados con ecuaciones de varios autores que consideran la falla desde la brecha

(Wang *et al*., 2018) así como las de los hidrogramas y dimensiones finales de las presas (Zhong *et al*., 2018).

Es necesario evaluar las condiciones en las que se encuentran las presas para su control y evaluación de riesgo. Un ejemplo es la normativa Australiana, estilo *plan-do-check-act*, en la cual se evaluaron las condiciones antes y después de la falla de la presa Samarco en Brasil (Burritt y Christ, 2018). En Vietnam, se hizo el análisis de las condiciones en las que se encuentran 22 pequeñas presas, comparando las políticas locales contra las internacionales (Pisaniello *et al*., 2015). Todas las presas presentan condiciones desfavorables: exceso de vegetación alrededor de las cortinas, algunas ya son viejas y están dañadas estructuralmente, compuertas inservibles, grietas en varias de ellas, etcétera. Todas estas características intervienen para que las pequeñas presas no descarguen los caudales que deberían y aumenten el riesgo de falla de las mismas, las que provocan daños sustanciales en las comunidades aledañas.

2. Metodología

2.1 Simulaciones en laboratorio

Las modelaciones se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro en un canal de fondo móvil de 4 m de largo, 0.61 m de ancho y 0.12 m de alto (figura 1). La entrada de agua es controlada por una válvula y el caudal por una bomba (220/240V/1ph/50Hz). Las capacidades del flujo varían de 0.1 a 4.5 l/s.

Figura 1. Canal de fondo móvil.

2.2 Medición de las alturas con sensores ultrasónicos.

Los tirantes de agua se midieron con sensores de nivel ultrasónicos programados con el sistema Arduino a una precisión de milímetros para mejorar la calidad de los datos. Las tarjetas de este sistema guardaban, en una memoria, las mediciones en un archivo de texto.

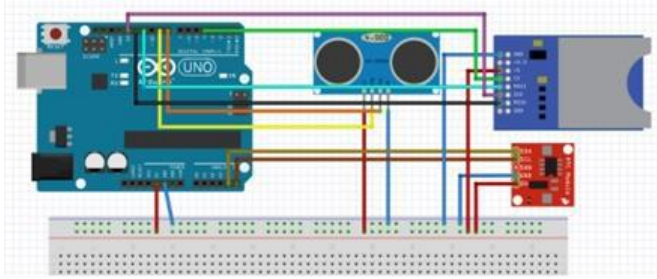

Figura 2. Conexión del sistema Arduino con el sensor ultrasónico.

Se procesaron los datos en *Excel* para conocer los caudales, después del rompimiento de la presa, utilizando la fórmula *Manning* con un coeficiente de rugosidad de 0.015 y pendiente del canal de 0.1%.

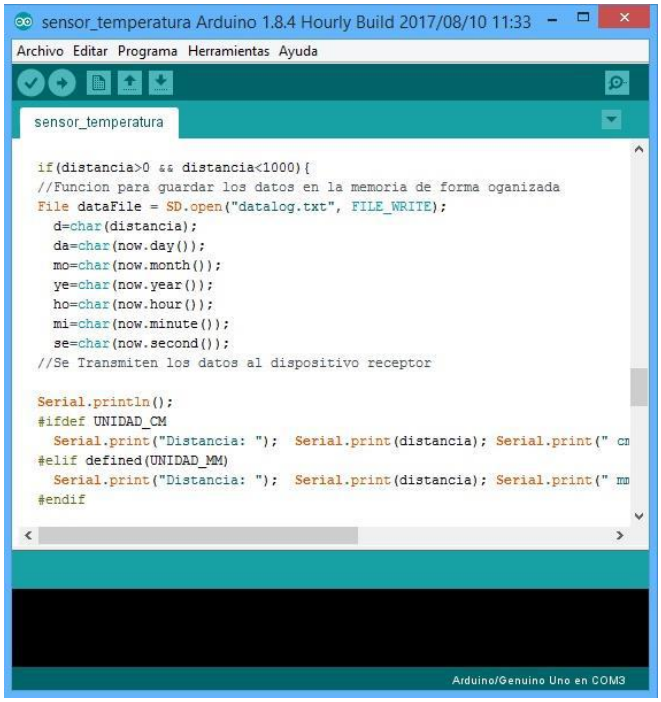

Figura 3. Programación en Arduino.

2.3 Escalamiento hidráulico

Al igual que Stolle *et al*. (2018), se recurrió a utilizar la teoría de semejanza de Froude para los flujos a superficie libre. Se consideró λ como el coeficiente de escala geométrica.

Figura 4. Presa construida en el canal.

Se realizaron tres simulaciones con materiales de diferentes tamaños de partículas (1.68 mm, 0.85 mm y arena con gravas pequeñas de 22 mm de diámetro promedio), y se diseñaron presas de 53 cm de ancho, corona de 5 cm y 10 cm de alto, taludes 2.4:1 que tomaban los 61 cm a lo largo del canal (figura 4). A cada presa se le colocó una brecha inicial al centro de la corona de forma triangular de 5 cm de largo y 2.5 cm de profundidad. Para estas simulaciones se utilizó un factor λ = 100 con el que se consideraría la altura de una presa de 10 m.

3. Resultados

De acuerdo con las fórmulas de similitud de Froude, se escalaron los caudales de llegada a la presa que se simularon en el canal:

$$Q = (q_{lab}) \times \left(\lambda^{5/2}\right) = Q\, {}^{m^3}/_{s}$$

$$Q = \left(0.9\, {}^{l}/_{s}\right) \times \left(100^{5/2}\right) = 90\, {}^{m^3}/_{s}$$

Los datos fueron obtenidos a cada segundo. Al aplicar la fórmula para escalar el tiempo, se obtienen los reales multiplicando los del laboratorio por la raíz del factor de similitud:

$$T = (t_{lab}) \times \left(\sqrt{\lambda}\right) = T\ min$$

$$T = (42\ seg) \times \left(\sqrt{100}\right) = 7\ min$$

En las figuras 5, 6 y 7, se muestran los hidrogramas medidos después de la ruptura de las presas de diferentes materiales.

En la figura 5, con el material de diámetro medio de 1.68 mm, se obtuvo un gasto pico escalado de 297 m^3/s en un tiempo de 3.5 minutos. Con el material de diámetro medio de 0.85 mm, el gasto pico se registró casi a los tres minutos con un valor de 166 m^3/s mostrado en la figura 6. La última prueba se realizó con una mezcla de material de arena y gravas de diámetro pequeño (22 mm), del que se obtuvo el hidrograma de la figura 7. En éste, se registró un gasto pico de 345 m^3/s en un lapso de dos minutos.

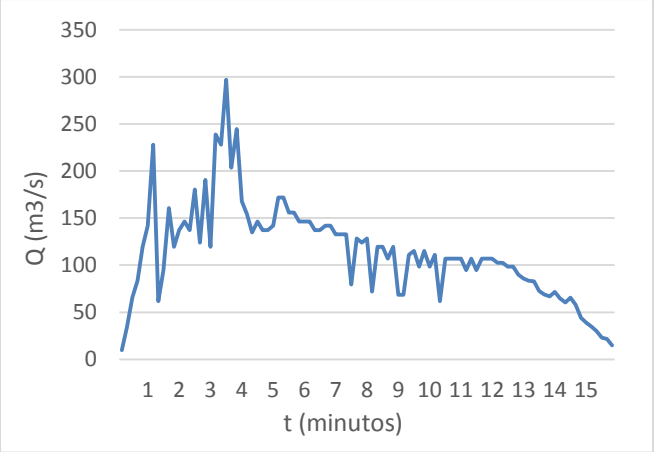

Figura 5. Hidrograma del rompimiento de la presa de material con *d* = 1.68 mm.

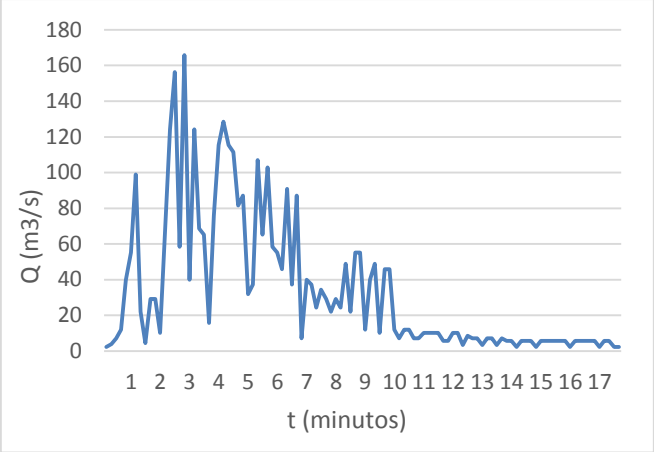

Figura 6. Hidrograma del rompimiento de la presa de material con *d* = 0.85 mm.

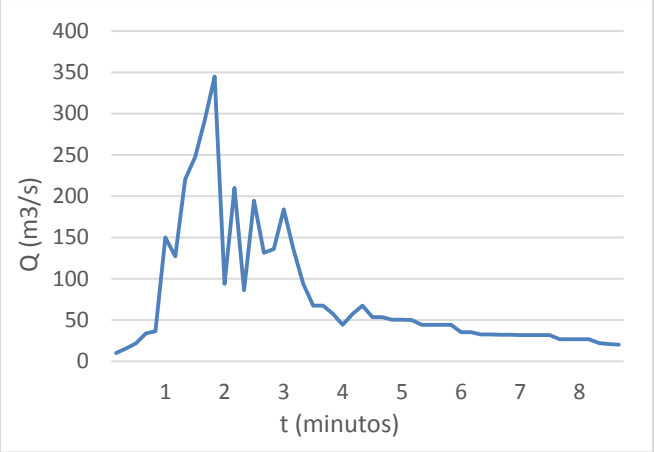

Figura 7. Hidrograma del rompimiento de la presa construida con arena y grava.

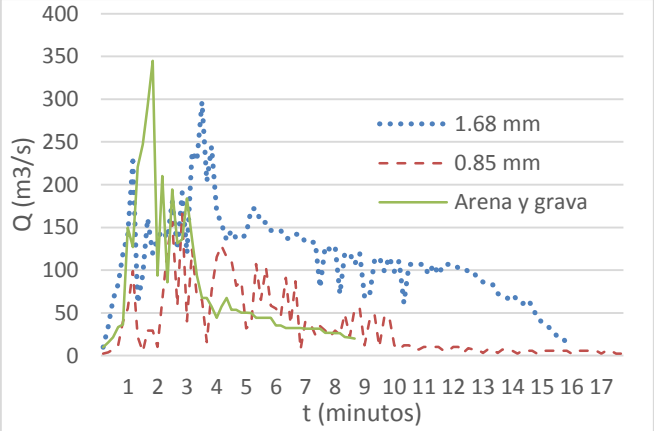

Figura 8. Comparación de los caudales obtenidos en las simulaciones.

Figura 9. Brecha final después del rompimiento de la presa de diámetro medio de 1.68 mm.

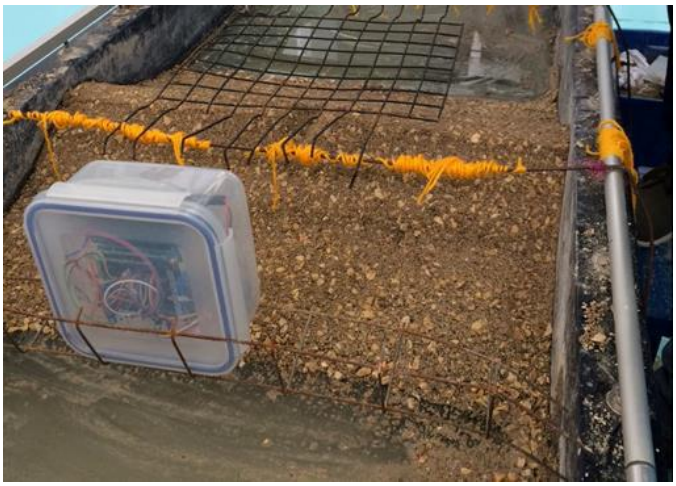

Figura 10. Sensor de nivel colocado aguas abajo de la presa de arena con grava.

La cantidad de escombros arrojados por el rompimiento de presas es una de las características importantes a considerar en la evaluación de daños provocados por este desastre. En las simulaciones el hidrograma que presentaba mayor caudal es el que tenía una brecha más amplia, lo que implica que es la que transportó mayor cantidad de sedimentos; esto tiene una relación con la cohesión del material. La figura 6 es la que presentó el caudal pico de menor valor y es el diámetro medio más pequeño de las pruebas. Se puede considerar que, al momento de compactarse, existía menor relación de vacíos y mayor cohesión por el tipo de material, lo que provocó que esta brecha fuera la que presentase menor deformación y generó el hidrograma de salida de menor volumen; caso contrario al de la presa de diámetro medio de 1.68 mm, que tuvo una brecha final muy afectada (ver figura 9).

4. Discusión y conclusiones

El tamaño y las propiedades del material con las que se construyen las presas son importantes ya que se demostró en las pruebas que generan una abertura en la brecha final después del rompimiento dependiente de esas características. En la prueba con diámetro medio de 0.85 mm, el hidrograma de salida fue el menor de las tres pruebas, pues se presentó una brecha final de menores dimensiones. Lo anterior implica que mayor parte del volumen de la presa se contuvo en el embalse y no se desalojó por el rompimiento.

El caudal pico de mayor valor fue el de la presa construida con arena y grava. Esto se puede deber a que estos materiales no contenían buena cohesión al momento de compactarse y la brecha de esta prueba fue la que se afectó más, por lo tanto el rompimiento fue más rápido en comparación con las otras presas y el caudal pico fue el mayor medido de las pruebas.

5. Referencias

1. Arganis-Juárez M, Bladé E, Dolz J, Sánchez M, Fuentes-Mariles Ó, Franco V y De Luna-Cruz F (2009). Simulación de la ruptura de la cortina de la presa La Parota, Guerrero, México, usando un algoritmo de alta resolución. *Ingeniería Hidráulica en México*. 23(3), pp.101-106.
2. Balmforth N, von Hardenberg J, Provenzale A y Zammett R (2008). Dam breaking by wave-induced erosional incision. *Journal of Geophysical Research*, 113(F1).
3. Burritt R y Christ K (2018). Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. *Journal of Cleaner Production*, 178, pp.196-205.
4. Fuentes-Mariles Ó, Arganis-Juárez M, De Luna-Cruz F y Franco V (2010). Estimación numérica del hidrograma de salida de una presa debido a su ruptura. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 11(3), pp.267-276.
5. Gabriel-Martin I, Sordo-Ward A, Garrote L y Castillo L (2017). Influence of initial reservoir level and gate failure in dam safety analysis. Stochastic approach. *Journal of Hydrology*, 550, pp.669-684.
6. Hervouet J (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), pp.2211-2230.
7. Kocaman S y Ozmen-Cagatay H (2012). The effect of lateral channel contraction on dam break flows: Laboratory experiment. *Journal of Hydrology*, 432-433, pp.145-153.
8. Kocaman S and Ozmen-Cagatay H (2015). Investigation of dam-break induced shock waves impact on a vertical wall. *Journal of Hydrology*, 525, pp.1-12.
9. Pilotti M, Maranzoni A, Milanesi L, Tomirotti M y Valerio G (2014). Dam-break modeling in alpine valleys. *Journal of Mountain Science*, 11(6), pp.1429-1441.
10. Pisaniello J, Dam T y Tingey-Holyoak J (2015). International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries. *Journal of Hydrology*, 531, pp.1141-1153.
11. Serazul Islam M (2015). Experimental and Numerical Approaches to Overtopping Levee Breach Effects in a River and Floodplain. American *Journal of Civil Engineering*, 3(2), p.31.
12. Stolle J, Takabatake T, Nistor I, Mikami T, Nishizaki S, Hamano G, Ishii H, Shibayama T, Goseberg N y Petriu E (2018). Experimental investigation of debris damming loads under transient supercritical flow conditions. *Coastal Engineering*, 139, pp.16-31.
13. Vergara Sanchez M (1993). Tecnicas de modelacion en hidraulica. Medellín: Alfaomega.
14. Wang B, Chen Y, Wu C, Peng Y, Song J, Liu W y Liu X (2018). Empirical and semi-analytical models for predicting peak outflows caused by embankment dam failures. *Journal of Hydrology*, 562, pp.692-702.
15. Zhong Q, Chen S y Deng Z (2018). A simplified physically-based model for core dam overtopping breach. *Engineering Failure Analysis*, 90, pp.141-155.