



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa
Hidrológico
Intergubernamental

Alternativas de obras hidráulicas para reducir el tiempo de formación de una brecha de ruptura en cortina de la presas

Waterworks alternatives to reduce the time of formation of a dam break breach

Miguel Ángel Sánchez Quijano^{1*}, Carolina Miguel González², Bruno Miguel Paz³
Eduardo Planos Gutiérrez⁴, José Vargas Baecheler⁵

Recibido: 14/06/2020

Aceptado: 6/08/2020

*Autor de correspondencia

Resumen

A través del análisis de ruptura de la presa, se identificaron los riesgos de inundación que surgen debido a una posible falla de la estructura por la ruptura de la cortina. Se consideró minimizar los daños sufridos como resultado de esta contingencia, así como establecer un sistema de advertencia efectivo. Se tuvo en cuenta las simulaciones del comportamiento hidráulico de este fenómeno a escala de tamaño, tanto en el laboratorio como en el software, colocando diferentes estructuras alrededor de la presa, para comparar y descubrir si hay un cambio significativo que pueda proporcionar una óptima solución a este problema. Se exponen también ejemplos de cómo en Cuba y Chile se conceptualiza este problema y se vislumbra la oportunidad de compartir experiencias en el tema en LAC.

Palabras clave: Ruptura, Simulación, Software, obra hidráulica, presa, canal experimental

Abstract

Through the analysis of the dam's break, the risks of flooding that arise due to a possible failure of the structure due to the break of the dam were identified. It was considered to minimize the damages suffered as a result of this incident, as well as to establish an effective warning system. Simulations of the hydraulic behavior of this phenomenon on a size scale were taken into account, both in the laboratory and in the software, placing different structures around the dam, to compare and discover if there is a significant change that can provide an optimal solution to this problem. There are also exposed examples of how this problem is conceptualized in Cuba and Chile, and the opportunity to share experiences on this subject in LAC is visualized.

Keywords: Dam break, Simulation, Software, Hydraulic works, Dam, Experimental channel

1 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Chetumal, México miguel.halo199611@gmail.com

2 Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Tepic, México. carolinamglez@hotmail.com

3 Centro de Investigaciones del Agua, CIAQ Universidad Autónoma de Querétaro, México. brunopaz57@gmail.com

4 Instituto de Meteorología (INSMET), Cuba. e_planos@yahoo.com

5 Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. jvargas@udec.cl

1. INTRODUCCIÓN

Las presas desempeñan un papel importante en la infraestructura hidráulica. Son construidas, entre otras razones, para beneficiar el desarrollo económico de una región o país, involucrando grandes inversiones de recursos financieros, naturales y humanos. Están compuestas por tres estructuras: el vertedor, la obra de toma y la cortina. Esta última, generalmente está armada de tierra, siendo el uso de estos materiales una influencia de falla debido a su vulnerabilidad en comparación a presas de concreto armado (Francisco, 2013).

Las estructuras deben ser proyectadas de tal forma que soporten las cargas de cualquiera de las fuerzas que puedan incidir sobre ésta durante el tiempo para la cual fue diseñada. Pero la experiencia ha demostrado que suele dedicarse mucho tiempo al diseño estructural y, contrariamente, un tiempo relativamente corto a los cálculos hidrológicos e hidráulicos, en especial a la determinación de los elementos de las avenidas, como la relación caudal máximo y volumen de agua; y la sucesión de caudales máximos (Matakiev, 1973).

En el caso de México, el 58% de las cortinas son de tierra, materiales graduados y enrocamiento (Arreguín-Cortés, 2013). En Cuba el 98% de las presas son de materiales sueltos. Existen múltiples causas que originan el rompimiento de la cortina por desbordamiento o por falla estructural, como son los deslizamientos, terremotos y las grandes precipitaciones. (Hooshyaripor et al., 2017). En este sentido, el primer quebrantamiento al cual se le hicieron simulaciones (Hervouet, 2000; Valiani et al., 2002), fue en el caso de Malpasset, Francia, en 1959.

En Cuba han ocurrido varios fallos de presas por rebase de la cortina, y esta ha sido la causa que más ha dañado las presas cubanas en los últimos 40 años (Molina et al, 2016; González et al, 2017). En catorce presas ocurrió este fenómeno, nueve de ellas colapsaron y en una se ejecutó el colapso intencional. Dada la cantidad mayoritaria de presas de tierra en Cuba, el tema que se aborda en este artículo es de particular importancia para la hidráulica cubana.

Según otros estudios, se ha logrado evitar el desbordamiento, a partir de la implementación de medidas de emergencia. Tal es el caso de la presa Attabad, en Pakistán (Chen et al., 2017). Incluso se han comparado dos desastres por ruptura de cortinas ocurridas en Bangladés y Japón, con simulaciones

para conocer si existe alguna semejanza entre ambos sucesos. (Islam & Tsujimoto, 2012). En México, Chile y Cuba también se han realizado estudios por medio de simulación. En México se puede ejemplificar el caso de la presa de “la Parota” en el estado de Guerrero, con lo que se pudo conocer el comportamiento del agua y generar un mapa para establecer puntos de inundación en la zona (Ernest Bladé, 2009).

La ruptura de una presa puede ocasionar fuertes inundaciones aguas abajo, este tipo de falla provoca, por lo general, inundaciones más catastróficas, en comparación con los causados por las precipitaciones (Hooshyaripor et al., 2017).

Además de los graves daños ambientales, un evento de este tipo puede causar grandes perjuicios económicos y sociales a los habitantes de la zona de aguas abajo. La sensibilidad de la población frente a ellos, depende en buena medida de los tipos de riesgos, de su exposición a los mismos y de la percepción del riesgo al que están expuestos.

Para resolver esta problemática, suelen existir normas legales y técnicas relacionadas con el diseño y la seguridad de las presas. En el caso de México existe la “Ley general de protección civil” y la norma NMX-AA-175, cuyo contenido establece los requisitos que deben cumplirse para la elaboración de un Plan de Acción ante Emergencias (PAE), su implementación en los casos de: una descarga extraordinaria, la inadecuada operación de las obras accesorias y/o la eventual falla de alguno de los componentes de la presa. (Secretaría de Economía, 2015; Secretaría de Servicios Parlamentarios, 2013). En el caso de Cuba existen normas técnicas ingenieriles para la determinación de los parámetros de diseño y seguridad de las obras, tanto desde el punto de vista hidrológico como ingeniero geológico; una Ley Nacional de Defensa que incluye lo relacionado con la protección civil y la Directiva 1 del Presidente del Consejo de Defensa Nacional que, entre múltiples aspectos, establece los estudios de Peligro, Vulnerabilidad y Riesgo, incluyendo en ellos las inundaciones por rotura de obras hidráulicas. En el caso de Chile, a pesar del elevado riesgo sísmico y significativa actividad volcánica, por un lado, la relevancia de la actividad minera en la construcción de presas para la disposición de relaves, y del sector privado en general, y una geografía comprendida entre la cordillera de Los Andes y el mar, y un extenso territorio que queda expuesto a regímenes

climáticos muy distintos, no existen normas técnicas o leyes unificadas que relacionen el diseño y seguridad de presas. Los temas están considerados en el Código de Aguas aprobado en 1981, y diferentes Reglamentos del Ministerio de Obras Públicas, de Minería y del Interior y Seguridad Pública.

Estudiar la evolución de la brecha en una cortina adquiere cada vez mayor importancia. Por lo que este trabajo se basa, principalmente, en investigaciones realizadas en México; así como también describe los enfoques utilizados en Chile y en Cuba. En las experiencias mexicanas, que constituyen a base de este trabajo, se utilizaron métodos de modelación perfeccionados a lo largo de los años de trabajo, resaltando la modelación unidimensional, como principal exponente (Wu & Wang, 2007); también se han usado simulaciones bidimensionales, que permiten observar el comportamiento del tirante y la velocidad (Hervouet, 2000; Xia et al., 2010). Por otra parte, existen métodos basados en la modelación tridimensional, que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes, promediadas por Reynolds (RANS), utilizando una metodología de volumen finito, para presas cuyos dominios son irregulares (Marsooli & Wu, 2014). Del mismo modo, los modelos 1D y 2D provienen de ecuaciones formulados de Saint Venant. (Bladé et al., 2014; Gunawan, 2013; USACE, 2008).

Hasta ahora, la mayoría de los estudios se han concentrado sólo en el rompimiento de la brecha y su evolución incluyendo la vegetación (He et al., 2017); en cascadas (Xue et al., 2011); con una sola pendiente (Wang & Pan, 2015); daños estructurales (Aureli et al., 2015); e incluso para desagües de fondo (Pozo et al., 2014).

A pesar de los múltiples trabajos realizados en México y Chile, sobre la evolución de una brecha, en la experiencia mexicana revisada para este artículo, no aborda cómo reducir los riesgos aguas abajo; mientras la práctica en Cuba si prevé esta situación. Las metodologías deben de incluir además de cómo evitar una ruptura de brecha y cómo disminuir los daños que puedan ocurrir si ésta se rompe y sobre todo evitar la pérdida de vidas humanas. En

correspondencia con lo anterior, este trabajo intenta aportar un enfoque novedoso a lo ya expuesto, con el principal objetivo de evaluar el comportamiento de la presa, probando alternativas de obras hidráulicas colocadas aguas arriba de la cortina, ya que si se reduce la velocidad de impacto con la que el agua llega a la brecha, los daños serían reducidos; y con la finalidad de que estas estructuras reduzcan en gran medida el tirante y las velocidades aguas abajo.

Sería importante examinar con mayor detalle una cantidad suficiente de estructuras con diferentes características, para así poder obtener la mejor solución para la protección de las cortinas ante una brecha. Sin embargo, debido a limitaciones de carácter práctico, este documento no puede pretender aportar una revisión exhaustiva de las mismas, por lo que para propósitos de este estudio se limitará a un ensayo de elemento base y siete ensayos de estructuras hidráulicas, los cuales se realizaran de forma experimental en laboratorio, y mediante la modelación 2D por computadora comparando ambos resultados.

Se demuestra mediante el manejo de modelos experimentales, matemáticos y análisis multivariado, que el empleo de obras hidráulicas aguas arriba de una presa, logran disminuir los tirantes, la velocidad aguas abajo y los arrastres de sedimentos, obteniéndose tiempos razonables para la alerta temprana y se reduce los riesgos por desbordamientos.

2. Metodología

2.1 Modelación Experimental

El experimento se desarrolló en el laboratorio de hidráulica en la Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, con apoyo de un canal de fondo móvil a base de acrílico de 4.00 m de largo, 0.61 m de ancho y 0.15 m de alto, con una pendiente de 0.1% (figura 1). Potenciado con una bomba de agua que posee un gasto de 0 a 7 l/s. Se controló el flujo a una medida estándar entre todas las pruebas de 1 l/s.



Figura 1. Sección vista en planta del canal de fondo móvil (acotación m)

Se ensamblaron ocho elementos idénticos a escala de presas, a los cuales se les aplicaron el gasto anteriormente dicho (figura 2). A varios de ellos se les colocó muros de contención alrededor del abanico generado cuando la brecha se rompe, Mientras que, a

la primera que fungió como elemento de control, no se le aplicó estructura adicional alguna, con el fin de observar el comportamiento de la ruptura sin protección.

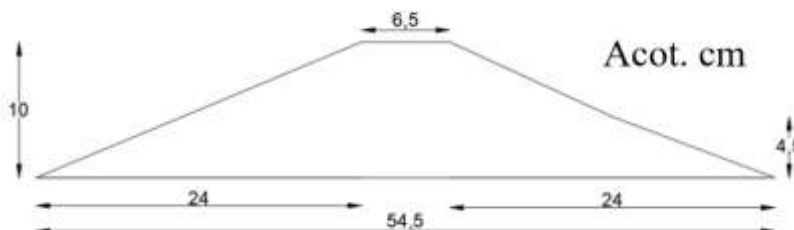


Figura 2. Forma de la presa a escala. (Acotación cm)

Se logró el objetivo en dos procesos. En primer lugar, mediante hecho real, utilizando el hardware “ARDUINO”, que permite un análisis comparativo entre los tirantes aguas arriba y aguas abajo; midiendo la altura mediante sensores de ultrasonido, además de mediciones de variables mediante un “Vernier”; y posteriormente se simula este experimento en una computadora con el software “IBER”, (Bladé et al., 2014).

2.1.1 Escala del modelo

El modelo tiene un diseño promedio para múltiples presas de terracería construidas en la República Mexicana; con una escala a 1:100, para facilitar el proceso experimental y el proceso computacional. Lo anterior facilitó realizar las modificaciones técnicas de conversión del gasto necesario para la ruptura de presa, por medio de semejanza dinámica; empleando la siguiente ecuación cuyo resultado se obtiene de la Ecuación de Semejanza de caudal.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (1)$$

donde

Q_p es el gasto de proyecto

Q_m es el gasto del modelo

λ es el factor de escala

2.2 Modelación numérica

Como sucede en varios casos, las ecuaciones que rigen los fenómenos físicos, a considerar en el modelo hidráulico, no se pueden resolver de manera analítica; por lo que es de importancia aproximarlos por medio de procesos computacionales, en este caso manipulando la ecuación de “Saint Venant”. La esencia de este método es sustituir los sistemas de ecuaciones parciales que rigen el fenómeno en el estudio, por sistemas de ecuaciones diferenciales, proporcionando valores en los puntos de la malla, mediante la solución de métodos explícitos e implícitos, los cuales están regidos por cierto intervalos de tiempo.

IBER, es un software libre que trabaja a partir de un modelo numérico matemático bidimensional para la simulación de flujo superficial, resolviendo las ecuaciones de “Saint. Venant”, creado desde la administración pública española en contribución con el grupo de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente GEAMA (Universidad de Coruña), del Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), del Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña y el Centro Internacional de Métodos numéricos en Ingeniería) (Bladé et al., 2014).

2.2.1 Ecuaciones

El software IBER tiene la capacidad de calcular el comportamiento hidráulico mediante la ecuación de "Saint Venant" en dos dimensiones, contemplando

los efectos de turbulencia y rozamiento superficial por viento (Bladé et al., 2014):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right) = -gh\frac{\partial hZ_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \quad (4)$$

en donde h es el tirante, U_x , U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b es la cota del fondo, τ_s es la fricción en la superficie libre debida al

rozamiento producido por el viento, τ_b es la fricción debida al rozamiento del fondo y V_t es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho gh \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad \tau_{b,y} = \rho gh \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}} \quad (5)$$

La fuerza de rozamiento realizada por el viento sobre la superficie libre se calcula a partir de la velocidad

del viento a 10 m de altura, utilizando para ello la ecuación de Van Dorn:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad \tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \quad (6)$$

donde, $V_{x,10}$, $V_{y,10}$ son las 2 unidades de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a 10 m de altura y C_{VD} es un

coeficiente de arrastre superficial que se calcula en función de la velocidad del viento a partir de la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

$$|V_{10}| > 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} + 2.25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2 \quad (8)$$

Todas las funciones y parámetros que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluyendo el coeficiente de Manning y la velocidad del viento) pueden imponerse de forma variable tanto espacial como temporalmente. La viscosidad turbulenta se calcula mediante modelos de turbulencia específicos para las

ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. IBER incluye 3 modelos de turbulencia promediados en profundidad: el modelo parabólico, un modelo de longitud de mezcla y el modelo k-ε de Rastogi y Rodi. En el modelo parabólico se calcula la viscosidad turbulenta como:

$$v_t = 0.068u_f h \quad u_f = \sqrt{\tau_b/\rho} \quad (9)$$

siendo u_f la velocidad de fricción de fondo. Utilizando la fórmula de Manning para calcular la

fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0.068\sqrt{gn|U|h^{\frac{5}{6}}} \quad (10)$$

3. Resultados

3.1 Comportamiento del abanico

Como punto inicial, se debe entender el comportamiento del abanico en el elemento de control. Por lo consiguiente, se determinó que al ingresar un gasto de 1 l/s, permitió delimitar que la

llegada a la altura a la brecha se prevé un tiempo aproximado de 80s para la simulación, además de tener el lapso en que el abanico se abre y erosiona el material, el cual no es más de 15s entre cada uno de los elementos que se realizaron en el modelo experimental (figura 3).

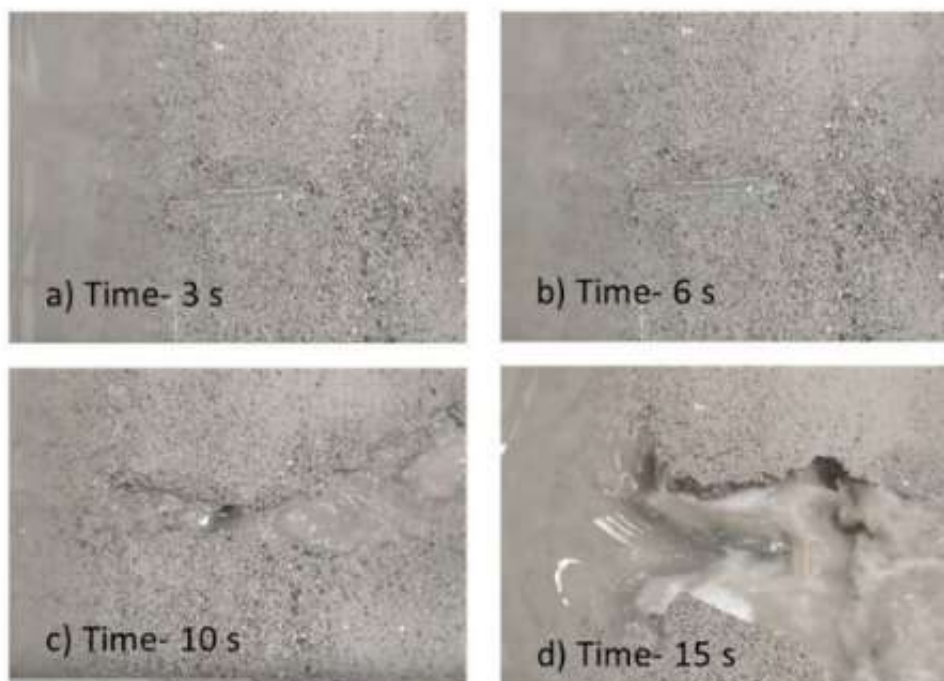


Figura 3. comportamiento de apertura del abanico

3.2 Geometría de arco

Durante el proceso experimental de las obras de alternativas de hidráulica, se observó que se presenta una formación de arco alrededor de la apertura dando así la forma geométrica de segmento circular, donde la apariencia fue variando debido a los distintos elementos estructurales colocados (figura 4).

Algunas variables a simple vista no son posibles de obtener, por lo que se concluyó por calcularse apoyados por el manual de fórmulas técnicas que

posee la solución este tipo de fracción, para obtener datos como área, radio y el ángulo (figura 5).

3.3 Análisis multivariado

Se consideró para el estudio el uso de un análisis multivariado, métodos estadísticos que permite analizar al mismo tiempo conjuntos de datos variables. En este caso se orientó en utilizar el método de análisis de conglomerados (clusters), esta observación nos permite agrupar casos, jerarquizar variables y relacionarlos entre sí. Dado que durante el proceso experimental se generaron alteraciones al

abanico, se pudo apreciar que cada uno de lo caso presentó cambios en dimensiones y profundidades, lo que otorga las variables como se muestra en la tabla 1. Cabe destacar que el caso 1 es el elemento base con el cual se comparó las obras. Con los resultados obtenidos se planteó el uso de múltiples métodos, que

posterioridad dieron resultados de gráficas, que permitieron conocer de entre las múltiples estructuras como se asemejan y la jerarquización de las más importante, teniendo en cuenta la reducción de riesgos y daños que genera la apertura de la brecha.



Figura 4. Forma del abanico

$$\alpha = 2\text{sen}^{-1}\left(\frac{s}{2r}\right) \tag{11}$$

$$r = \frac{h}{2} + \frac{s^2}{8h} \tag{12}$$

$$A = \frac{h}{6s}(3h^2 + 4s) \tag{13}$$

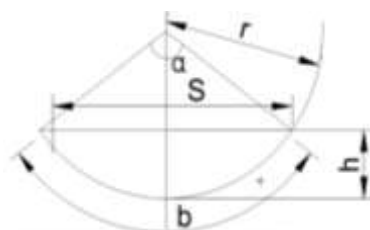


Figura 5. Características de sección circular

Tabla 1. Datos obtenidos de las pruebas de presas

BRECHA	A	b	h	s	$\hat{\alpha}$	α	r	p	a	Ar	T1	T2	G
C1	311.58	39.30	7.65	29.50	1.91	109.65	18.04	5.10	13.30	100	39	36.80	90
C2	329.29	38.00	6.60	29.50	1.68	96.43	19.78	7.10	6.92	60	78	28.15	90
C3	325.07	37.00	6.80	29.50	1.73	99.00	19.40	6.60	11.74	70	60	28.33	90
C4	314.87	35.00	7.40	29.50	1.86	106.57	18.40	6.40	10.40	64	60	25.76	90
C5	595.84	46.00	6.42	37.00	1.34	76.55	29.86	5.80	17.37	71	70	26.00	90
C6	585.13	49.00	5.30	35.00	1.18	67.40	31.54	5.50	35.00	81	50	26.83	90
C7	497.93	45.00	6.80	35.00	1.48	84.94	25.92	8.40	26.00	62	60	27.66	90
C8	104.94	19.40	4.22	17.00	1.84	105.61	10.67	7.32	3.00	32	70	25.76	90

A es el área del segmento circulares (cm^2)
 b es la longitud del arco (cm)
 h es el ancho del Arco (cm)
 s es el largo de la apertura del segmento circular (cm)
 $\hat{\alpha}$ es el ángulo del segmento del círculo (rad)
 α es el ángulo del segmento del círculo en grados
 r es el radio del círculo (cm)

p es la profundidad (cm)
 a es el ancho de la apertura (cm)
 Ar es el arrastre de los sedimentos (cm)
 $T1$ es el tirante aguas arriba (mm)
 $T2$ es el tirante aguas abajo (mm)
 G es el gasto (m^3/s)

3.4 Método de Ward

Como lo indica el autor del método, los conglomerados deben asumirse de tal manera que, al agruparse, la merma de información resultante de la fusión sea mínima, ponderando los datos obtenidos como la suma de las distancias al cuadrado de cada elemento respecto al centroide del conglomerado que pertenece. A continuación, se calculan las distancias euclidianas al cuadrado entre cada elemento, y los centroides de todos los conglomerados. Por último, se suman las distancias proporcionadas a todos los elementos. Para verificar el cálculo se genera la gráfica de Dendograma, que permite visualizar las

relaciones entre los múltiples datos, para lo cual se sabe que, en todo análisis multifactorial, se desaprovecha algo de información durante el agrupamiento, pero se logra resumir una gran cantidad de información. Durante el proceso se tiene en cuenta el uso de todas las variables, con excepción del área, debido que genera una afectación a la visualización de la gráfica y a la vez no es tan relevante en comparación a las otras variables obtenidas (figura 6-2). Además, se planteó el dendograma de los casos (obras hidráulicas) para comparar las obras que tuvieron ciertas similitudes indicado en la figura 6-1.

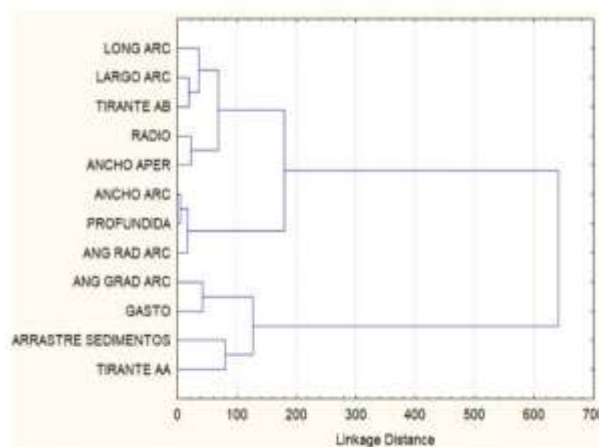
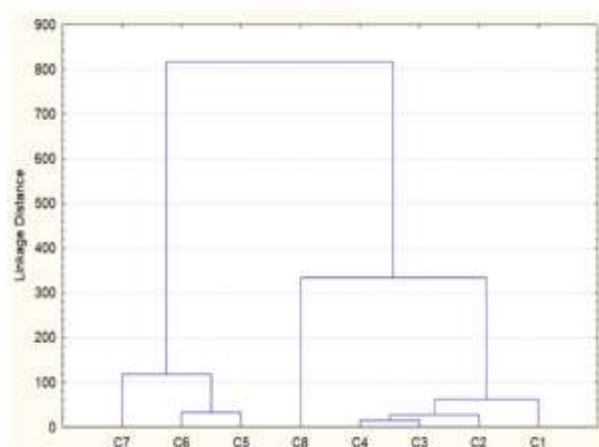


Figura 6. 1) Dendograma de obras durante el proceso experimental, 2) Dendograma de Variables obtenidos durante el proceso experimental

3.5 Análisis clúster de los modelos

Una vez realizado cada uno de los modelos y analizado los dendogramas obtenidos mediante software, si bien no se contemplaron todas las variables posibles de los casos, se puede denotar que unos poseen una interacción, que se presenta a continuación: El tirante aguas abajo junto con el largo del arco son las causales de la longitud de arco, por ende, entre menor sea el tirante, mayor es la

posibilidad de que la longitud del arco se reduzca. Como se expresó en las fórmulas, el ancho de la apertura va en conjunto con el radio. Consecuentemente, un factor que se debe de reducir a priori son éstos, debido que mientras mayor sea la apertura, mayor será el tirante aguas abajo, provocando mayores inundaciones. El ancho de arco determina la profundidad, lo que da a entender que sea cual sea el ancho de la apertura, el largo y la

longitud de arco no son muy influyentes, aunque en conjunto aportan valor al daño que se pueda presentar durante la catástrofe. Además, el tirante aguas arriba

y el gasto, rigen el arrastre del material e incluso ambos son la base de que todas las anteriores variables actúen.



Figura 7. a) Resultados con Elemento de Control (Caso 1), b) Resultados con el caso 4, c) Resultados con el caso 5

En el caso del segundo dendograma, permite conocer las similitudes entre los casos (obras hidráulicas) contemplando todas las variables, pero la importancia esta de grafica se aprecia en el caso 8, el único que no se asemeja a los demás casos; reflejando que sus características tienden a ser muy diferentes, debido a que presentó peculiaridades que redujeron el efecto de la ruptura, aminorando los daños, principalmente del arrastre y la apertura de la brecha. Aunque se mantuviera el gasto y los tirantes muy semejantes, lo que en premisas da como una conclusión positiva. No obstante, se debe analizar por medio de jerarquización de casos.

3.6 Jerarquización de datos

Dado a que el dendograma solo otorga las similitudes entre las variables y los casos, para determinar la

importancia entre cada una de las obras hidráulicas, se realizó un análisis de componentes principales y clasificación (figura 8). Con esto se determina, con mayor certeza, la obra que concede los mejores resultados en la reducción de daños y amortiguación en la apertura de la brecha, teniendo en cuenta de que cada uno de los casos tenían las mismas condiciones (forma de apertura y gasto). Para comprender el resultado se debe exponer la Figura 8, donde los casos son marcados en un plano cartesiano, los cuales se encuentran dispersos, dependiendo de las características que se obtuvieron en las pruebas (apertura brecha, Profundidad, tirantes, largo y longitud de arco, entre otros factores), considerando la mejor entre todas cuando se encuentre más alejado del punto (0,0) en ambos ejes.

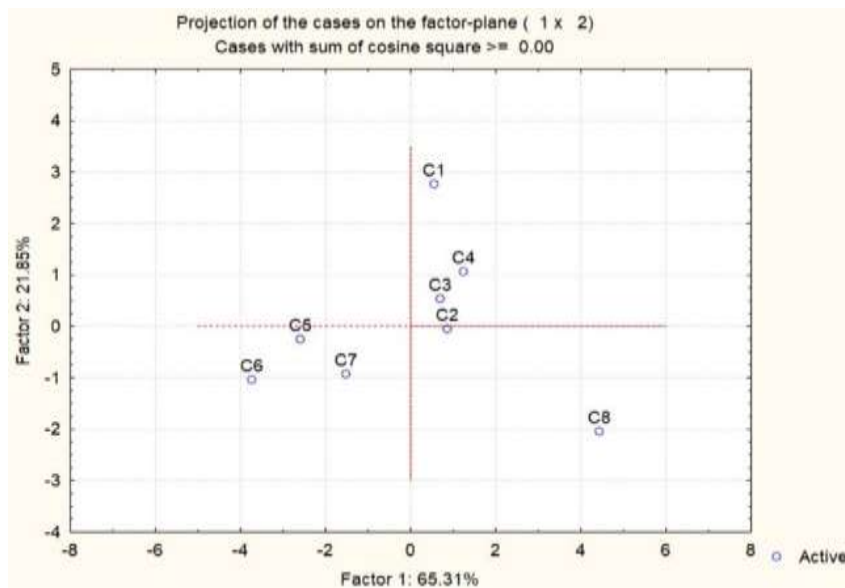


Figura 8. Jerarquización de los casos obtenidos

3.7 Comparación entre los distintos casos de presas.

Dado que la representación del elemento de control fue demostrado al momento de la calibración del modelo físico (Sánchez Quijano et al., 2018), se

presentan los resultados obtenidos con las obras de los casos 4 y 5 colocadas aguas arriba, para su comparación.

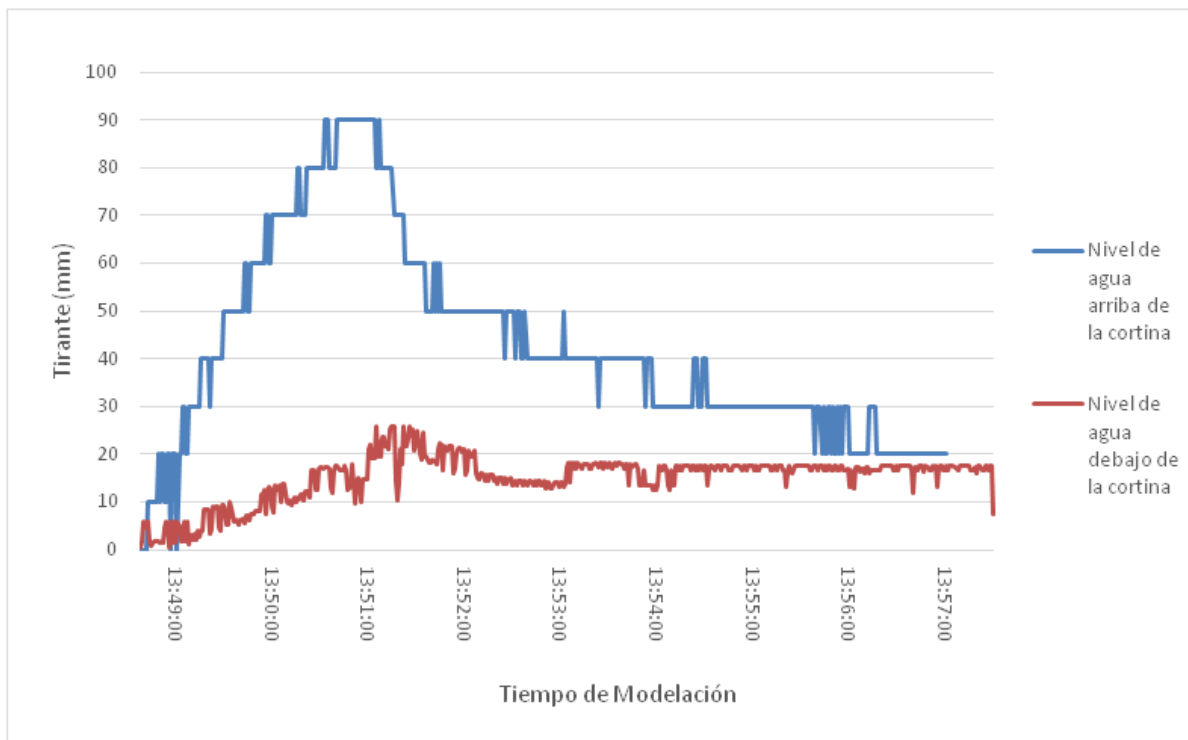


Figura 9. Tirantes obtenidos mediante prueba experimental (caso 4)

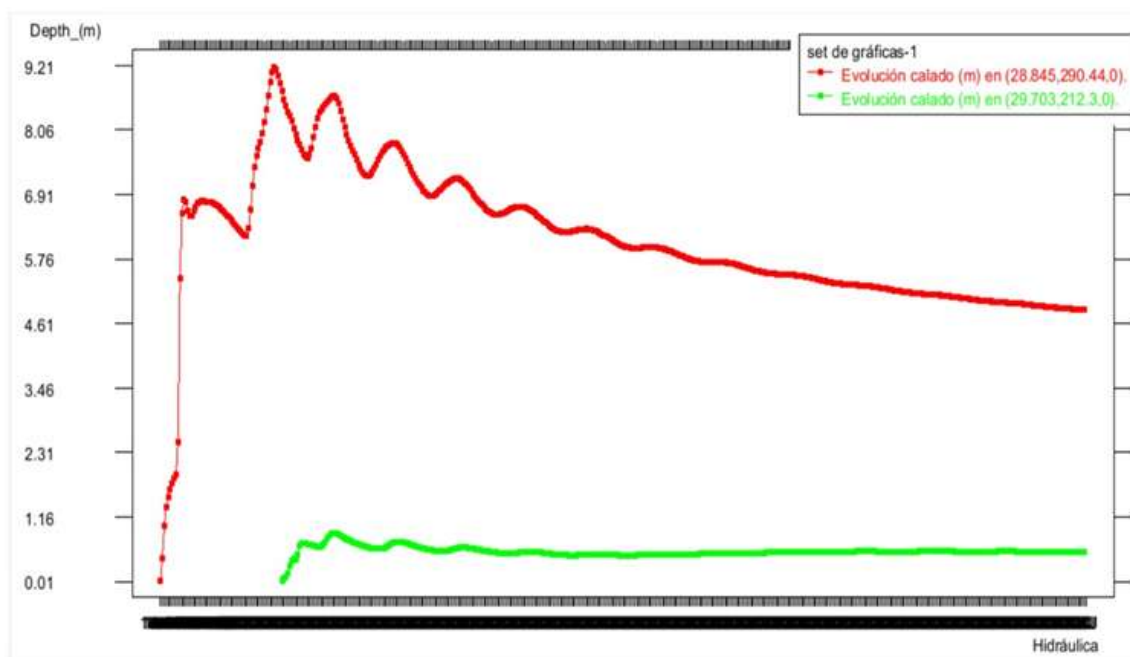


Figura 12. Tirantes obtenidos mediante modelación computacional (caso 5)

4. Discusión

Para determinar si las obras son fundamentales en la reducción de la apertura de la brecha se realizaron múltiples estudios, y si bien en la mayoría de los casos no hubo un efecto significativo que pudiera dar la pauta para establecer una reducción de daños. Se pueden apreciar teniendo en cuenta la observación del fenómeno por sí solo, algunas obras tienden a proveer un beneficio a favor de la reducción del peligro de ruptura. La distancia euclidiana generada con los casos en la jerarquización de datos visto en la Figura 8, permite conocer la semejanza o diferencia del comportamiento del modelo; El manejo de un plano cartesiano con las múltiples obras hidráulicas utilizadas que tienen la denominación de C# dan como resultado que, si reconocemos a C1 como el elemento de control, las pruebas C5, C6, C7 y C8 se encuentran alejadas y las pruebas C2, C3, C4 cercanos de este y por consecuencia tienden a tener una disimilitud y aproximación en el comportamiento respectivamente, lo que permite dar un primer acercamiento a las posibles obras que tienen un fenómeno distinto. Sin embargo, es necesario tener otros parámetros para apreciar con más claridad la diferencia de la conducta del desastre. Si se ve del lado de la modelación experimental, algunos casos aparentan ser el de menor afectación en todos los

sentidos, lo que da inicio al debate de la confiabilidad del software y el modelo numérico, puesto que la modelación experimental tiene criterios que afectan al comportamiento, como la filtración debido a la baja compactación que posee el material granular, una situación que el modelaje pasa por alto. A manera de ejemplo, los casos C4 y C5 representados en las figuras 9 y 11 en su modelo experimental con ARDUINO se demuestra que la diferencia de tiempo por el cual se retiene el embalse (tirantes aguas arriba), el proceso de la apertura y la estabilidad de los tirantes aguas abajo es de valor de un minuto del modelo del C5 con respecto al C4, al trasladarlo al fenómeno escalado puede significar un lapso mayor, que ayudará a poseer beneficio a la hora de generar evacuaciones o sistemas de alerta. En los modelos numéricos representados en las figuras 10 y 12 realizados con el Software IBER son las representaciones escaladas del fenómeno, por lo que sus dimensiones están establecidas a metros. Sin embargo, las figuras no representan un cambio significativo como se pudo apreciar en el modelo experimental, se puede deber que a diferencia del experimental existen parámetros que no se pueden tomar en cuenta, como en el caso del arrastre de sedimentos. Entonces se justifica que es posible usar la obra para prevenir dichos problemas, aunque es

necesario un análisis económico, para comparar el desempeño, el beneficio y el costo, situación que no fue planteada en esta investigación, pero abre las puertas para futuros proyectos y así mejorar lo ya estudiando.

4.1 Recomendaciones

Con el fin de prevenir catástrofes, es recomendable que programas, como la International Flood Initiative (IFI), desarrollen un sistema de vigilancia y desastre en la región de América latina, como ya se tiene presente en Cuba, donde en primer lugar la inspección y mantenimiento periódicos de las presas son de gran ayuda; estos procesos también se tomarían en cuenta cada vez que ocurre un fenómeno meteorológico, hidrológico o geológico significativos. Como norma, al menos cada cinco años, se actualizará del peligro de inundaciones aguas abajo, como parte de la obligatoriedad en el país de mantener actualizados los estudios de peligrosidad, vulnerabilidad y riesgo (PVR). Lo anterior debe de estar vinculado al sistema nacional de vigilancia y alerta temprana de peligros climáticos, meteorológicos, hidrológicos y oceanográficos.

5. Conclusiones

La respuesta a la reducción del fenómeno por medio de obras hidráulicas en la sección del embalse (nivel aguas arriba) de la presa, se consideró como probable. Debido a que se obtuvo una reducción en la brecha. Sin embargo, por haber tenido mayores tirantes y considerando las limitaciones de la modelación, no se puede considerar que sea ésta la opción más confiable. Un análisis económico de costo-beneficio puede ser determinante en la evaluación positiva o negativa de estos resultados. Por ello, se hace hincapié en la necesidad de una evaluación económica. También se obtuvieron resultados opuestos, con obras auxiliares perjudiciales para la cortina, este es el caso 5 (Figura 11) y obras beneficiosas, como el caso 4 (Figura 9). Esta investigación queda abierta para continuar trabajando y encontrar una combinación de obras, para reducir efectos negativos en las presas, y en todos sus elementos y evitar su rompimiento o aminorar los daños que existan aguas arriba y debajo de la cortina.

Agradecimientos

Este trabajo se desarrolló en el marco del XXVIII Verano de la Investigación Científica 2018 y del XXIII Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico 2018. Por ello, los autores agradecen a la Academia Mexicana de Ciencias y al Programa Delfin, respectivamente.

REFERENCIAS

- Arreguín-Cortés, F. I. (2013). Inventario Nacional de Presas y Embalses. *Tecnología y ciencias del agua*, IV(4), 179–185. <https://doi.org/978-99954-774-3-1>
- Aureli, F., Dazzi, S., Maranzoni, A., Mignosa, P., & Vacondio, R. (2015). Experimental and numerical evaluation of the force due to the impact of a dam-break wave on a structure. *Advances in Water Resources*, 76, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.11.009>
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Bladé, Ernest. (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*, XXIV(3), 101–106.
- Chen, X., Cui, P., You, Y., Cheng, Z., Khan, A., Ye, C., & Zhang, S. (2017). Dam-break risk analysis of the Attabad landslide dam in Pakistan and emergency countermeasures. *Landslides*, 14(2), 675–683. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0721-7>

- Francisco, C. D. (2013). Modelado empírico simple del rompimiento de presas pequeñas de tierra. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, número 3, 377–388.
- González Y; O. Guedes; S. Rodríguez (2017). Monografía Las fallas en presas de tierra, Caso de Estudio: falla por estabilidad de taludes en función de las condiciones de drenaje. 132 pag. ISBN 978-959-261-533-2. La Habana. Cuba.
- Gunawan, P. H. (2013). Numerical method for Saint-Venant equations and related models.
- He, Z., Wu, T., Weng, H., Hu, P., & Wu, G. (2017). Numerical simulation of dam-break flow and bed change considering the vegetation effects. *International Journal of Sediment Research*, 32(1), 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2015.04.004>
- Hervouet, J. M. (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), 2211–2230. [https://doi.org/10.1002/1099-1085\(200009\)14:13<2211::AID-HYP24>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200009)14:13<2211::AID-HYP24>3.0.CO;2-8)
- Hooshyaripor, F., Tahershamsi, A., & Razi, S. (2017). Dam break flood wave under different reservoir's capacities and lengths. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 42(9), 1557–1569. <https://doi.org/10.1007/s12046-017-0693-x>
- Islam, M. S., & Tsujimoto, T. (2012). Comparisons of levee breach and successive disasters in floodplain between Bangladesh and Japan. *Procedia Engineering*, 28(2011), 860–865. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.824>
- Marsooli, R., & Wu, W. (2014). 3-D finite-volume model of dam-break flow over uneven beds based on VOF method. *Advances in Water Resources*, 70, 104–117. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.020>
- Matakiev, D (1973). Formas de las avenidas en Cuba. Edit. Organismos. Instituto de Hidroeconomía. La Habana, Cuba.
- Molina, S; O. Alvarez y Y. González (2016). Análisis y solución de la patología en presas de Cuba: Estado del arte. 16 pag. <https://www.researchgate.net/publication/317295636>
- Pozo, D., Salazar, F., & Toledo, M. A. (2014). Modelación del funcionamiento hidráulico de los dispositivos de aireación de desagües de fondo de presas mediante el método de partículas y elementos finitos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 30(1), 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.11.002>
- Sánchez Quijano, M. A., Miguel González, C., & Gutierrez-Lopéz, A. (2018). Modelación hidrológica de la rotura de presa utilizando el software IBER. *Revista NTHE*, 24 (ISSN: 2007-9079), 34–40.
- Secretaria de Economía. (2015). NORMA MEXICANA NMX-AA-175-SCFI-2015 DE RIESGO Y CLASIFICACIÓN DE PRESAS.
- Secretaría de Servicios Parlamentarios. (2013). LEY GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL (pp. 1–15).
- USACE. (2008). Hydrologic Modeling System Applications Guide. March.
- Valiani, A., Caleffi, V., & Zanni, A. (2002). Case Study: Malpasset Dam-Break Simulation using a Two-Dimensional Finite Volume Method. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(5), 460–472. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:5\(460\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(460))
- Wang, L. H., & Pan, C. H. (2015). An analysis of dam-break flow on slope. *Journal of Hydrodynamics*, 26(6), 902–911. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(14\)60099-8](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60099-8)
- Wu, W., & Wang, S. (2007). One-Dimensional Modeling of Dam-Break Flow over Movable Beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(1), 48–58. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:1\(48\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:1(48))
- Xia, J., Lin, B., Falconer, R. A., & Wang, G. (2010). Modelling dam-break flows over mobile beds using a 2D coupled approach. *Advances in Water Resources*, 33(2), 171–183. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.11.004>

Xue, Y., Xu, W. L., Luo, S. J., Chen, H. Y., Li, N. W., & Xu, L. J. (2011). Experimental study of dam-break flow in cascade reservoirs with steep bottom slope. *Journal of Hydrodynamics*, 23(4), 491–497. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(10\)60140-0](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(10)60140-0)

Como citar este artículo:

Sánchez Quijano et al., (2020). Alternativas de obras hidráulicas para reducir el tiempo de formación de una brecha de ruptura en cortina de la presas. *Aqua-LAC* Volumen 12(2), 1-14. doi: 10.29104/phi-aqualac/



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license