

Cuantificación experimental del volumen regulado por la construcción de una presa rompepicos

Mario A. Jurado Hernández¹ y Pablo Talamantes Contreras²

Resumen

A través de la modelación hidráulica en laboratorio, se pretende obtener los hidrogramas que se presentarían en la zona del Nuevo Parque Industrial, en el sur del municipio de San Juan del Río, Querétaro, para cuantificar el volumen regulado por una presa rompepicos construida recientemente. Utilizando sensores de nivel, se miden los tirantes en un canal de fondo móvil ubicado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Autónoma de Querétaro. Los datos se procesan para obtener los caudales y escalarlos con las relaciones de similitud de Froude para observar la respuesta del escurrimiento en dos escenarios, sin la presa y con esta obra construida. Se observa una disminución en la magnitud del gasto pico del escenario simulado ($T_r=50$ años) en un 75%, por la contención del caudal de llegada a esta presa; además, se demuestra

que el embalse se vacía en un periodo de 5 horas, lo cual es de gran ayuda, considerando que la presa estaría lista para recibir otra avenida.

Palabras clave: volumen regulado, sensores de nivel, presa rompepicos.

Abstract

Through the hydraulic modeling on laboratory is planned to get the hydrographs that would appear in the Nuevo Parque Industrial zone on south of San Juan del Río, Querétaro, to quantify the regulated volume by a cut-peak-flow dam recently built. Using level sensors, the level of water is measured in a mobile bed tank located in the Hydraulic Laboratory of the Universidad Autónoma Querétaro. Data are worked to obtain the flow rate and to scale it with the Froude similitude relationships to see the response of flow on two sceneries, with and without the dam. It is shown a decrease of the magnitude of peak flow of the simulated case ($T_r=50$ years) in a 75% by the contention of the inflow in this dam, plus the demonstrating that the reservoir is emptied within 5 hours, which is very helpful considering that the dam would be ready to receive another inflow.

Key words: regulated volume, level sensors, cut-peak-flow dam

Introducción

La construcción de presas a lo largo del mundo responde a la necesidad de almacenar agua para el abastecimiento de comunidades cercanas, riego de cultivos, y generación de energía con las presas hidroeléctricas, así como a la de controlar avenidas provocadas por lluvias de gran magnitud y frecuencia, a fin de salvaguardar el bienestar de la sociedad. Varias políticas, a lo largo del mundo, se han desarrollado para asegurar el buen funcionamiento de las presas y asegurar la seguridad de las personas que viven aguas debajo de estas estructuras. Regulaciones internacionales, como la de World Bank's Regulatory Frameworks for Dam Safety, son el estándar para evaluar la calidad de las presas que hay en cada país (Pisaniello *et al.*, 2015). Para conocer las condiciones en las que se encuentran los ríos antes y después de la construcción de presas, hay que analizar los registros

¹mario_jurado23@hotmail.com

²tpabloc@uaq.mx

¹ y ²Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro

Fecha de recepción:
28 de septiembre de 2018

Fecha de aceptación:
05 de diciembre de 2018

hidrométricos históricos (Mailhot *et al.*, 2018) y conocer las variables más significativas para el cambio en los regímenes de flujo provocados por la existencia de una presa (Zhang *et al.*, 2017). La construcción de presas ayuda a disminuir la descarga de sedimentos hacia aguas debajo de las cuencas ya que regula los ríos y una cantidad importante de suelo erosionado se retiene en el fondo del embalse (Li *et al.*, 2018).

Determinar los hidrogramas de salida de las presas es esencial para conocer la disponibilidad de agua después de su construcción. Otro caso es evitar escurrimientos potenciales que pongan en riesgo las poblaciones cercanas. Estos escurrimientos súbitos se pueden presentar por el rompimiento de presas o por la ruptura sus elementos, como las compuertas o vertedores de descarga en la cresta. Existen distintas metodologías para calcular los hidrogramas de salida después de eventos hidrológicos extraordinarios, tanto numéricas como experimentales (Gabriel-Martin *et al.*, 2017). La modelación hidráulica en laboratorio acompañada de simulaciones en computadora es muy interesante a la hora de comparar resultados. Para hacer las simulaciones en laboratorio se pueden utilizar distintos canales de fondo móvil y de diferentes materiales (Balmforth *et al.*, 2008; Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2011; Islam, 2015). Las modelaciones en computadora han sido muy utilizadas para representar diferentes escenarios que pueden ocurrir en presas (Hervouet, 2000; Arganis *et al.*, 2009; Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2012; Islam y Tsujimoto, 2012), además del uso de diferente *software* para hacer análisis estadísticos de las condiciones futuras de un embalse (Fuentes *et al.*, 2010; Gabriel-Martin *et al.*, 2017; Mailhot *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017).

A través del análisis del hidrograma unitario se pueden predecir las curvas de ascenso, el pico y la curva de recesión para ciertas zonas, con la cantidad de mediciones adecuadas. En Lafayette, Indiana (EUA), se estudió la respuesta de una zona de cultivo a diferentes lluvias para comparar los hidrogramas medidos ($t=100$ h) con instrumentación sofisticada contra los calculados por el método del hidrograma unitario; se encontraron curvas de recesión similares, útiles en la cuestión de esparcir

los nutrientes o fertilizantes para cultivos como maíz y soya (Gall *et al.*, 2010).

En la Universidad de Cukurova, en Turquía, se hizo la modelación del rompimiento de una presa en un pequeño canal de 30 cm de ancho por 8.0 m de largo, al cual se le instalaron dos obstáculos triangulares para reducir la sección del canal aguas abajo en una tercera parte. Se midieron los hidrogramas en seis puntos diferentes del canal de paredes y fondo de vidrio, para visualizar los perfiles del agua que contenía un colorante y apreciar mejor los niveles del agua. La complementación del análisis se hizo en el programa Flow-3D, con la extensión RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes), y se obtuvieron hidrogramas similares a los medidos experimentalmente, con errores de 4.86% después de 36 horas de simulación en la computadora (Kocaman y Ozmen-Cagatay, 2012), con la desventaja de que el *software* no toma en cuenta el transporte de sedimentos.

En la provincia de Quebec, Canadá, existen 443 estaciones hidrométricas de las cuales se tomaron datos diarios de 70 estaciones que cumplieran con datos de más de cinco años, sin pérdida de datos por cinco años, cuencas aguas arriba con áreas mayores de 100 km² y estaciones debajo de los 50° N de latitud. Se evaluó el grado de regulación para todas las estaciones con el objetivo de identificar los datos de ríos que tienen influencia por las presas que son operadas para regular los caudales y las que no. Se determinó que el 30% de los datos obtenidos son potencialmente afectados por la operación de presas (Mailhot *et al.*, 2018).

En el norte de Beijing se estudiaron 40 medidas que tenían que ver con magnitud, variabilidad y frecuencia, duración, tiempos y rangos de cambios (positivos y negativos). Estas características se tomaron de 3 estaciones en la cuenca de la presa Miyun (14.7 mil km²). Se hizo un análisis estadístico multivariado utilizando la técnica del análisis de componentes principales (PCA) con el programa "R" y se encontraron 14 variables que sobresalen de las demás para ser consideradas las más importantes en los cambios de régimen de flujo debido a una presa

(caudales altos, caudales bajos, días sin flujo, cambios positivos en los caudales de un día para otro, cambios negativos en los caudales de un día para otro), usando dendogramas e histogramas (Zhang *et al.*, 2017).

Se estudian las características de varios tipos de materiales que constituyen las presas alrededor del mundo: material cementado, arena-grava-roca, roca-concreto, suelo. Se determina que las presas hechas de material cementado tienen mejor respuesta hacia eventos extraordinarios con menor área de desastre, en comparación con las de materiales granulares y con la posibilidad de construirse con grandes alturas. En términos económicos y de construcción son más útiles que las otras en porcentajes de 10 a 20% en costo, y estructuralmente se evalúan como presas de tierra (Jia *et al.*, 2016).

En México, existen varias presas de concreto compactado para regular avenidas y evitar desbordamientos de los ríos sobre los que están construidas (e.g. Presa Trigomil, Jalisco; San Lázaro, Baja California Sur; Presa Rompepicos, Nuevo León; Presa Amata, Sinaloa (Valtierra, 2013).

Otra manera más natural de evitar gastos pico de gran magnitud en zonas de montaña es la construcción de pequeñas presas por los mismos habitantes de estas regiones. En Bélgica se reintrodujo un tipo de castor (*fiber*) que estaba en peligro de extinción, el cual, con el paso de los años, construyó 6 presas a lo largo del recorrido del río Cheval. Se hizo la comparación histórica de los gastos pico de 1978 a 2009 con la construcción de los diques en 2004. De acuerdo con Nyssen y otros (2011), el tiempo de retraso de los gastos pico se recorrió aproximadamente en 1 día, dato interesante para la consideración de la respuesta de los ríos de montaña en zonas que tengan este tipo de castores.

1. Metodología

2.1 Zona de estudio

La zona de influencia se encuentra localizada en el municipio de San Juan del Río, en el estado de Querétaro, en la zona industrial sobre la Avenida México, con coordenadas 99°57'22.01" de longitud y 20°22'8.03" de latitud. La microcuenca de estudio

tiene un área de 1.24 km², de los cuales 50.09% corresponde a agricultura temporal; 48.87%, a zona urbana, y 1.04%, a matorral y maleza. Tiene una pendiente de 5.7%, tiempo de concentración de 0.35 horas calculado por un promedio con los métodos de Rowe, Kirpich y del SCS.

2.2 Precipitación y Modelo Hidrológico de Avenidas

Se decidió tomar los datos de la estación climatológica 22022 “San Juan De Río (DGE)” de CONAGUA por tener influencia en la cuenca, la cual cuenta con información de lluvia a partir del año 1987 y hasta el año 2011. Dentro de este periodo, las láminas máximas anuales se presentaron en 2005, 2010 y 2014, con valores de 78.5, 143.5 y 76.5 mm, respectivamente. Utilizando el programa “Ajuste de Funciones AX”, desarrollado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), se estimó la mejor función de ajuste probabilístico con sus parámetros (Doble Gumbel) para calcular las precipitaciones a diferentes periodos de retorno mostradas en la tabla 1.

Para representar los hidrogramas, se utilizó el método del hidrograma triangular unitario, adoptado por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), con el cual se obtuvieron los gastos máximos para los periodos de retorno de 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años (tabla 1).

Tr (años)	5	10	25	50	100	200	500	1000
Hp (mm)	61.01	78.85	115.59	146.28	176.05	205.19	243.22	271.83
Qp (m ³ /s)	4.511	8.407	18.356	27.92	37.88	48.079	61.86	72.485

Tabla 1. Láminas de precipitación y gastos máximos a los periodos de retorno

2.3 Estructura a simular

En 2017, comenzó el proyecto para construir un dique rompepicos en la zona industrial, para evitar escurrimientos súbitos en las colonias aguas abajo de la cuenca (colonia México e Infonavit Pedregoso). En la figura 1, se muestran las características de la cortina, que contiene una escotadura en el centro y un vertedor de excedencias para cuando la capacidad de almacenamiento rebasa el nivel de la escotadura.



Figura 1. Dique rompepicos.



Figura 2. Canal de fondo móvil.

```

sensor_temperatura Arduino 1.8.4 Hourly Build 2017/08/10 11:33
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda

sensor_temperatura

int distancia; //Variable del sensor
int aux=0; //Variable para notificacion de sd
int dis; //Variable filtrada del sensor
char d, se, mi, ho, da, mo, ye; //Variables del tiempo
long tiempo; //Variable resultante del tiempo
void setup() {

  Wire.begin(); // Inicia el puerto I2C
  RTC.begin(); // Inicia la comunicación con el RTC

  Serial.begin(9600); //Inicializa la comunicacion con el Xbee

  pinMode(9, OUTPUT); //Salida de pulsos para el trigger del sensor
  pinMode(8, INPUT); //Entrada de la señal de censado del sensor
  pinMode(7, OUTPUT); //LEDS
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  Serial.print("InitializingSD card...");
}

```

Figura 3. Programación en el sistema Arduino.

2.4 Modelación en laboratorio y escalamiento hidráulico

Las simulaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, en un canal de fondo móvil de fibra de vidrio reforzado con plástico y algunos elementos de acero que le proporcionan su rigidez. El flujo es controlado por un equipo que regula la bomba del canal (220/240V/1ph/50Hz) y una válvula con capacidades de 0.1 a 4.5 l/s. Las dimensiones de la zona de pruebas son 411 cm de largo, 61 cm de ancho y 12 cm de alto (figura 2). Se hizo la simulación con una representación de la presa construida en acrílico.

Para el escalamiento hidráulico, se recurrió a las fórmulas de semejanza de Froude, que trabajan con flujos a superficie libre. Se considera λ como el coeficiente de escala geométrica, de acuerdo con las dimensiones en campo y las dimensiones del canal en laboratorio $\lambda=42$.

2.5 Sensores ultrasónicos

Para realizar las mediciones del escurrimiento se utilizaron sensores de nivel (ultrasónicos) manejados con el sistema Arduino, debido a la precisión de las lecturas y a su facilidad de instalación en el canal. Los sensores guardan los datos medidos en una memoria con precisión a milímetros.

2. Resultados

Se recolectaron los datos medidos en dos pruebas realizadas en el canal: 1) sin obra de protección y 2) con el dique rompepicos. Los datos fueron guardados en un archivo de texto y se procesaron en el programa Excel. A partir de las medidas de tirantes de agua, presentados en la parte final del canal, se aplicó la ecuación de Manning para obtener el caudal transitado en litros por segundo y, después, escalarlo con las relaciones de Froude a m^3/s . La fórmula para escalar el caudal es la siguiente:

$$\frac{Qp}{\frac{5}{\lambda^2}} = \frac{27.92 \text{ m}^3/\text{s}}{42^{\frac{5}{2}}} \times 1000 = 2.442 \text{ l/s}$$

Se simuló el escenario del periodo de retorno de 50 años, por ser este el caso máximo a simular, debido a las capacidades de volumen de agua del canal, con un caudal pico de 27.92 m³/s escalado al laboratorio a 2.442 l/s. El hidrograma calculado al periodo de retorno tenía una duración de 1.33 h (80 min) y, escalado a condiciones de laboratorio, la simulación duró 12 minutos con 20 segundos. Se usó la siguiente fórmula para escalar el tiempo:

$$\frac{t}{\sqrt{\lambda}} = \frac{80 \text{ min}}{\sqrt{42}} = 12.344 = 12'20''$$

En la figura 4 se observa la descarga a través de la escotadura de la presa simulada en el laboratorio, así como el volumen que contiene.

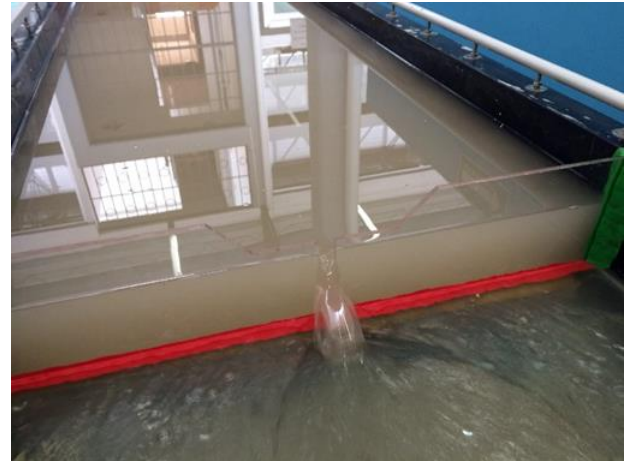


Figura 4. Simulación de la presa funcionando

La figura 5 muestra los hidrogramas medidos en el laboratorio con las dos condiciones simuladas. En la gráfica se observan los valores elevados del hidrograma si no existiese el dique; asimismo, se demuestra que el hidrograma de salida de la presa rompepicos disminuye notablemente el gasto pico, de 28 m³/s a 7.1 m³/s.

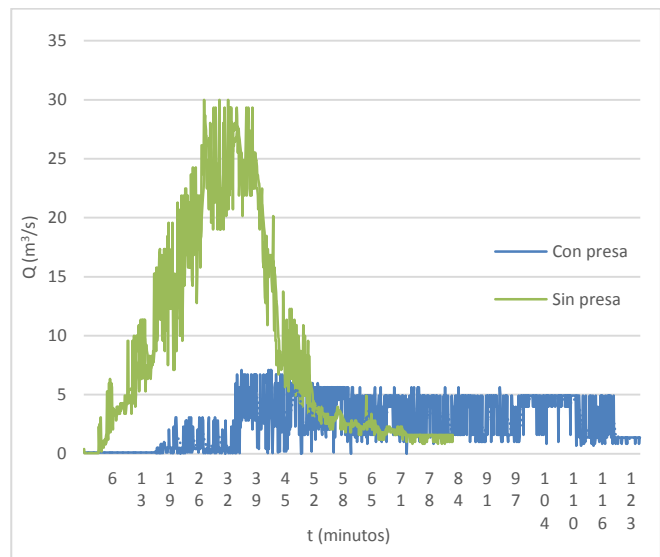


Figura 5. Hidrogramas obtenidos de las simulaciones en el laboratorio

El volumen regulado por esta obra, de acuerdo con la simulación, es de 5,280 m³ midiendo el área bajo la curva del hidrograma sin el dique, pero por encima del hidrograma con la obra. Esto se calculó en el programa Excel, ya que los datos que se obtuvieron fueron a cada segundo, y se hizo la resta de los valores en cada punto de esta zona regulada.

El hidrograma de salida con el dique muestra que después de dos horas, la presa descarga gran parte del volumen regulado y por la escotadura fluye un caudal de alrededor de 1 m³/s, lo cual es poco en comparación con el caudal que se presenta en los primeros 120 minutos, más aún si se compara con el flujo de los primeros 50 minutos sin la presencia de la obra.

	B	C	D	E	F	G
338	6.7189948	24.891529	22.601814			
339	2.8091419	26.136387	20.513803			
340	2.8091419	29.343732	23.364004			
341	3.0840908	21.877661	19.068519			
342	3.0840908	22.469018	15.750023			
343	6.7189948	25.511195	23.221481			
344	2.8091419	29.343732	26.53459		Volumen total regulado	
345	2.8091419	24.277432	18.654848		5279.1312	m3
346	3.0840908	26.136387	26.046378			
347	3.0840908	27.403175	21.423446			
348	5.6225837	21.877661	19.068519			
349	3.0840908	26.767061	26.382947			
350	6.7189948	25.511195	25.341343			
351	6.7189948	21.877661	15.158667			
352	2.8091419	28.044685	22.064957			
353	2.0457326	29.343732	26.53459			

Figura 6. Cálculo del volumen regulado

3. Discusión y conclusiones

La presencia de una presa ayuda a contener grandes volúmenes de agua para evitar que afecten zonas vulnerables después de eventos hidrológicos extremos; dependiendo de su operación, se determina su capacidad. Si la presa tiene el objetivo de abastecer zonas de cultivo, tiene una obra de toma para obtener grandes volúmenes y así satisfacer las necesidades de las zonas aledañas. La mayoría de este tipo de construcciones tiene vertedores de descarga o compuertas que requieren de operación para que las capacidades de la presa no se rebasen y provoquen una ruptura que genere desastres catastróficos.

Considerando, a pesar de las modificaciones de cobertura en el suelo en la zona de estudio, que el caudal en el punto de salida debe ser el mismo, el gasto que se debe amortiguar y por el cual se diseñó esta estructura de regulación es del orden de $11 \text{ m}^3/\text{s}$ para un periodo de retorno de 50 años.

Es importante considerar la existencia de una escotadura que pueda descargar el volumen de la presa en magnitudes cuatro veces menores a las que se presentarían si no estuviese esta obra presente, para el control de avenidas en microcuencas. Retrasar el caudal pico de $28 \text{ m}^3/\text{s}$ a $7.1 \text{ m}^3/\text{s}$ con estas características de la presa es un punto a favor de este tipo de obras.

La principal virtud de esta presa rompepicos es, además de regular una gran cantidad de volumen de agua (calculado en la figura 6), que en dos horas descarga la mayor parte de este volumen y, eventualmente, se vacía en un periodo poco mayor de cinco horas (de acuerdo a la simulación en laboratorio $t_{\text{lab}}=50 \text{ min}$ y $t_{\text{campo}}=324 \text{ min}$), sin necesidad de operación alguna.

4. 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. 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.
4. 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.
5. Gall H, Jafvert C y Jenkinson B (2010). Integrating hydrograph modeling with real-time flow monitoring to generate hydrograph-specific sampling schemes. *Journal of Hydrology*, 393(3-4), pp.331-340.
6. Hervouet J (2000). A high resolution 2-D dam-break model using parallelization. *Hydrological Processes*, 14(13), pp.2211-2230.
7. Islam M y Tsujimoto T (2012). Comparisons of Levee Breach and Successive Disasters in Floodplain between Bangladesh and Japan. *Procedia Engineering*, 28, pp.860-865.
8. Jia J, Lino M, Jin F y Zheng C (2016). The Cemented Material Dam: A New, Environmentally Friendly Type of Dam. *Engineering*, 2(4), pp.490-497.
9. 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.
10. Li Z, Xu X, Xu C, Liu M y Wang K (2018). Dam construction impacts on multiscale characterization of sediment discharge in two typical karst watersheds of southwest China. *Journal of Hydrology*, 558, pp.42-54.
11. Mailhot A, Talbot G, Ricard S, Turcotte R y Guinard K (2018). Assessing the potential impacts of dam operation on daily flow at ungauged river reaches. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 18, pp.156-167.
12. Nyssen J, Pontzele J y Billi P (2011). Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: example from the Cheval in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *Journal of Hydrology*, 402(1-2), pp.92-102.
13. 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.
14. 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.
15. Valtierra A (2013). Tendencias en el diseño de las presas. *Construcción y Tecnología en Concreto*, pp.60-64.
16. Vergara Sanchez M (1993). *Técnicas de modelación en hidráulica*. Medellín: Alfaomega.
17. Zhang Y, Shao Q y Zhao T (2017). Comprehensive assessment of dam impacts on flow regimes with consideration of interannual variations. *Journal of Hydrology*, 552, pp.447-459.