

DIMENSIONAMIENTO DE BRECHA Y ESTIMACIÓN DE DAÑOS POTENCIALES POR RUPTURA DE PRESA EL PALOTE (MÉXICO)

Mobayed Khodr, Nabil

Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, MÉXICO
Asociación Mexicana de Hidráulica, Delegación Querétaro
nmkh2o@gmail.com

RESUMEN

Se ha hecho la modelación numérica del flujo transitorio bidimensional que produciría una posible ruptura de cortina de la presa El Palote (Guanajuato, México), lo anterior derivado de la resolución emitida por CONAGUA tras identificarse filtraciones en la estructura. Para definir las dimensiones de la brecha que se puede formar, se admite que la velocidad máxima alcanzada corresponde al flujo rápidamente variado que tendría lugar al momento de ocurrir una falla súbita (ola positiva). Para cuantificar los daños, se utilizan datos del censo de vivienda (INEGI) y resultados de la modelación hidráulica. Para el tirante promedio por manzana, se lee fracción del costo máximo por tipo de casa (gráficas de vulnerabilidad del CENAPRED) y se multiplica por el número de casas en cada manzana. El total se alcanza al sumar estos productos por tipo de casa, multiplicar cada subtotal por su valor tipo e integrar resultados en un importe final.

ANTECEDENTES

Un modelo digital de elevación de precisión centimétrica (MDE) – como el que se genera mediante cartografía LIDAR– sirve para cuantificar con más precisión los daños potenciales de una creciente causada por la descarga súbita de una presa, como la que pueda suceder por causa de una ruptura. Ayuda ante todo a justificar cualquier trabajo de reforzamiento en el cuerpo de la cortina y mejora de las obras de control, así como acciones de conservación en la cuenca vertiente que sirvan para disminuir el aporte de sedimentos hacia las presas y demás cuerpos de agua.

La ciudad de León, Guanajuato (México) cuenta con información topográfica de alta resolución, lo que permite efectuar un estudio pormenorizado de lo que podría suceder si ocurriera una falla en la presa El Palote, la más importante dentro del área metropolitana. Durante el mes de septiembre del 2016, en efecto, expertos del Consultivo Técnico de la CONAGUA y personal de la Dirección Local Guanajuato, efectuaron inspecciones al vaso de esta presa tras haber recibido reportes sobre filtraciones observadas en el cuerpo de la cortina. Emitieron después una resolución que, más adelante, dio lugar a la elaboración del estudio de falla por ruptura de dicha obra, así como del impacto adverso que tal fenómeno pudiera ocasionar a los habitantes de la ciudad de León, aguas abajo de la estructura colapsada (SAPAL, 2017).

OBJETIVOS

Hacer la modelación numérica del flujo transitorio bidimensional (o 2D) rápidamente variado que puede producir la ruptura súbita de cortina de la presa El Palote (Guanajuato, México); definir una anchura efectiva de la brecha que se puede formar (siendo que la obra tiene más de 2 km de longitud); y proponer un procedimiento para la cuantificación de daños potenciales que pueden suceder, por causa de la falla, aguas abajo de la presa.

DIMENSIONAMIENTO DE BRECHA

El modelo numérico adecuado para simular el flujo transitorio bidimensional rápidamente variado que se produce aguas abajo de la ruptura de algún dique o cortina, debe incluir, en sus condiciones de frontera, el tratamiento del llamado cauce seco (en condiciones iniciales) y la entrada del escurrimiento expresada mediante hidrogramas o ecuaciones que modelen el caudal a través de compuertas o vertedores, incluso brechas que se pudieran formar en el cuerpo de alguna obra de control. Tras una revisión de literatura técnica y consultas en *internet*, se ha elegido el programa IBER© para tal propósito (Bladé *et al.*, 2014).

Este programa tiene la posibilidad de modelar un escenario donde se suponga la formación súbita de una brecha en el cuerpo de una cortina. La aplicación no modela el fenómeno físico de la ruptura como tal; sólo permite asignar una geometría a la mencionada brecha y, de manera súbita (en media hora o menos), asumir que se alcanza el gasto máximo en tales condiciones de falla extrema.

Aun cuando la aplicación estima el valor máximo de caudal, precisa que el usuario indique el ancho máximo de la falla, dato que puede resultar impreciso a pesar de las recomendaciones que documenta la literatura. Una de ellas, por ejemplo, sugiere que la brecha alcance un ancho equivalente a un tercio de longitud de la cortina, cuando es de materiales graduados, valor que podría resultar excesivo en el caso de la presa El Palote, cuya longitud excede de 2 km. Se ha planteado entonces el criterio siguiente.

Se determina el gasto máximo con alguna de las ecuaciones semiempíricas más conocidas. El Ministerio de Medio Ambiente de España, por ejemplo, recomienda la expresión siguiente que toma en cuenta el volumen del vaso C , en Hm^3 , y su profundidad máxima y_0 , en m (Hagen, 1982; MMA, 2001):

$$Q_{\max} = 525 (C \cdot y_0)^{0.42} \quad (1)$$

Se admite que la velocidad máxima V_{\max} alcanzada es el valor teórico conocido en el caso de ancho unitario sin fricción, para el cual se establece una profundidad del agua y , la cual se mantiene constante durante el fenómeno transitorio –conocido como ola positiva– en tanto no cambie la profundidad o nivel de almacenamiento (Streeter y Wylie, 1979). Las expresiones son las siguientes:

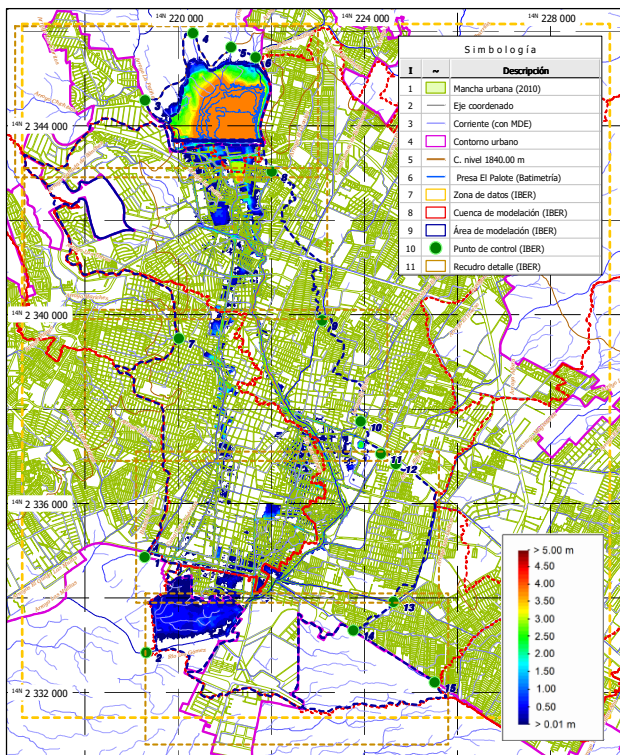
$$V_{\max} = \frac{2}{3} \sqrt{g y_0}, \quad y = \frac{4}{9} y_0 \quad (2)$$

Suponiendo que se forma una brecha de sección trapezoidal, con taludes 1:1 (según se recomienda en la literatura), se obtiene que:

$$A_{\max} = \frac{Q_{\max}}{V_{\max}} = \frac{1}{2} (B + b) \left(\frac{4}{9} y_0 \right) \quad (3)$$

de modo que el cálculo de los anchos de brecha mayor y menor, B y b , se obtienen de manera directa. Para el caso de la presa El Palote, por ejemplo, se toma el nivel máximo en condiciones de operación (o NAMO), esto es 1838.20 m y un fondo que se aproxima a la cota 1831.00 m. Esto determina un valor $y_0 = 7.20$ m. A este nivel, la capacidad del vaso –batimetría del año 2017– es $C = 15.749 \text{ Hm}^3$. Al sustituir en la ecuación (1), se determina $Q_{\max} = 2370 \text{ m}^3/\text{s}$. Y, con respecto a la velocidad, se obtiene que $V_{\max} = 5.603 \text{ m/s}$. Al considerar entonces que $B = b + 2y$ en la expresión (3), se obtiene que $B = 135 \text{ m}$, en vez de 700 m que habrían resultado mediante otras expresiones empíricas de la literatura (WRRL, 1998).

El resultado del modelo matemático con el programa IBER© para estas condiciones iniciales y de frontera, pasado a formato gráfico *raster* compatible con el MDE de alta resolución empleado, se puede apreciar en la siguiente figura (para mayores detalles del proceso, se recomienda consultar el informe de SAPAL, 2017):



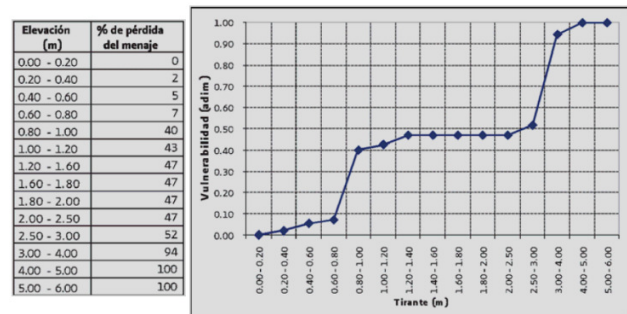
ESTIMACIÓN DE DAÑOS POTENCIALES

El Sistema Nacional de Protección Civil y el CENAPRED, en México, han propuesto una metodología para identificar y evaluar la vulnerabilidad de una población urbana ante la ocurrencia de una inundación (SEGOB, 2011). Como principal base de datos se tiene la información completa del Censo General de Población y Vivienda (CGPV), desagregada precisamente en función del nivel de vivienda, manzana o área geostatística básica (AGEB).

Como parte de los datos que se levantan durante los censos poblacionales, el tipo de materiales empleados en la construcción urbana puede servir para la evaluación del impacto que causan las inundaciones; de ahí que la metodología aprovecha tales datos para definir una tipología de la vivienda y su comportamiento ante esta clase de contingencias. Se establecen así cinco tipos, equiparables con su

vulnerabilidad: I o muy alta (por ejemplo, casa construida con lámina de cartón y techo de asbesto), II o alta, III o media, IV o baja y V o muy baja (como una casa con muros de tabique y techo de losa de concreto).

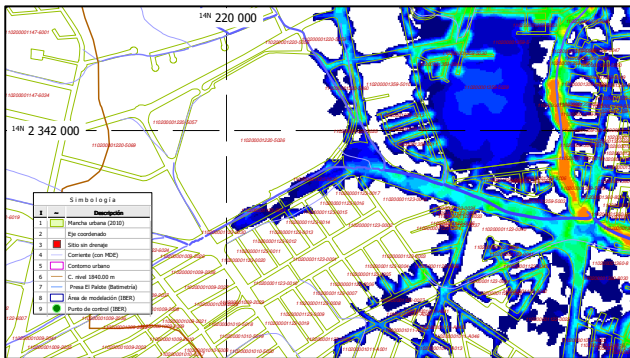
Se tipifica también el *menaje* de la vivienda (muebles y enseres menores) y se hace una cuantificación de daños por cada tipo, en función del tirante que puede alcanzar el agua tras la ocurrencia de una inundación. Se definen con ello cinco gráficas o funciones de vulnerabilidad tal que las ordenadas corresponden al costo del daño total, expresado como fracción del máximo posible (entre 0.00 y 1.00), y las abscisas al tirante o profundidad del agua, en intervalos de 0.20 m y hasta un máximo igual o superior a 2.00 m (para las viviendas Tipo I a III) e incluso mayor de 4.00 m (Tipo IV y V). La próxima figura ilustra la gráfica de vulnerabilidad para viviendas de Tipo IV (SEGOB, 2011):



La actividad entonces consiste primero en acceder a la base de datos del Censo de Población y Vivienda del INEGI (2010), a nivel registros, y descargar la información para el poblado de interés. De igual manera, se debe contar con el plano manzanero de la localidad. Así, con el tipo de material de muros y techumbres, se procede a clasificar cada vivienda en los tipos I a V. Para una clasificación a nivel de manzana, habría que verificar cuántas viviendas quedan comprendidas en cada una y cuál tipo se repite más.

En resumen, para cuantificar los daños de una inundación causada por ruptura de la cortina de una presa, se deben utilizar: las funciones dimensionales referidas, los datos del censo de población y vivienda, así como las matrices de resultados de la modelación hidráulica. Para el tirante promedio de inundación calculado por manzana, se lee la fracción del costo máximo por tipo de casa (de las gráficas de vulnerabilidad) y se multiplica por el número de casas censado en cada manzana. El total se alcanza al sumar estos productos por tipo de casa, multiplicar cada subtotal por su valor tipo e integrar los resultados en un importe final. Se puede tener desde luego un recuento de daños por zonas o también generar mapas de riesgo, este último definido como el valor del daño (producto de la fracción de vulnerabilidad por el valor de los bienes expuestos) multiplicado por la probabilidad de ocurrencia de cada evento analizado.

La próxima figura muestra un ejemplo de superposición de capas de información para la zona urbana de León, Guanajuato, que incluye parte de la mancha urbana y las áreas inundadas tras la ruptura de la presa, según el modelo hidráulico. Se incluyen las *claves de manzana* utilizadas por el INEGI con fines de identificación, necesarias para hacer la geo-referenciación entre datos del censo y las áreas de la ciudad expuestas al riesgo de inundación:



Con parte del proyecto elaborado para SAPAL (2017), se desarrolló el programa **Impacto_PLV**. Con el mismo, se pueden generar tablas como la mostrada a continuación con fines ilustrativos, que dan cuenta de los resultados obtenidos a nivel de manzanas afectadas por causa de una inundación severa como la estudiada. Al final, el programa presenta una síntesis del impacto adverso provocado por un evento así. En el caso de una posible ruptura de la presa El Palote, se tendría lo siguiente: **757 Ha inundadas, así como 132,430 habitantes y 37,393 viviendas** afectadas, con diferente total de *menajes* dañados por tipo de vivienda. De ser necesario, estos últimos totales por *menaje* tipo ayudarían a obtener un costo aproximado de los percances.

Num	Poligono	Prfd	Sup(%)	Sup(m2)	Manzana (INEGI)	PobTot	VivTot	PisoDT	PisoT	VH_Auto	VH_PC	VivT3	VivT4	VivT5	Nmnj3	Nmnj4	Nmnj5
1	1375	0.793	40.3	2125	11 020 0001 1137 057	132	36	28	4	15	5	4	17	15	1.240	1.190	1.950
2	1376	0.643	20.9	1100	11 020 0001 1137 056	191	46	38	6	20	18	6	20	20	1.860	1.400	2.600
3	1377	0.270	14.4	800	11 020 0001 1137 055	160	43	39	0	20	7	0	23	20	0.000	0.460	0.400
4	1378	0.320	8.7	475	11 020 0001 1137 054	94	31	20	5	16	10	5	10	16	0.150	0.200	0.320
5	1379	0.670	1.1	75	11 020 0001 1137 053	140	31	28	0	13	9	0	18	13	0.000	1.260	1.690
6	1380	0.664	38.3	2175	11 020 0001 1137 049	208	57	46	7	18	7	7	32	18	2.170	2.240	2.340
7	1381	0.236	2.4	125	11 020 0001 1137 048	191	47	38	7	23	12	7	17	23	0.210	0.340	0.460
8	1385	0.882	77.6	2075	11 020 0001 1137 041	169	41	39	0	15	6	0	26	15	0.000	10.400	7.950
9	1386	0.286	21.6	825	11 020 0001 1137 040	182	47	45	0	12	4	0	35	12	0.000	0.700	0.240
10	2572	0.759	66.3	2300	11 020 0001 2493 016	312	74	70	0	18	9	0	56	18	0.000	3.920	2.340
11	2605	1.283	48.7	8200	11 020 0001 1300 016	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
12	2606	1.690	53.2	6900	11 020 0001 1300 015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
13	2608	0.661	38.4	1875	11 020 0001 1300 005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
14	2609	2.098	76.5	15550	11 020 0001 1300 019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
15	2610	0.422	4.1	650	11 020 0001 1300 021	31	5	5	0	4	4	0	1	4	0.000	0.050	0.400
16	2612	0.532	2.2	1775	11 020 0001 1300 001	53	7	4	0	3	0	0	4	3	0.000	0.200	0.300
17	2613	0.631	8.1	6750	11 020 0001 1300 009	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000
18	2614	0.709	25.7	17775	11 020 0001 1353 003	180	62	51	0	33	20	0	29	33	0.000	2.030	4.290
19	2615	1.441	100.0	699	11 020 0001 171A 038	33	8	8	0	7	5	0	1	7	0.000	0.470	4.410
21	2693	0.845	13.4	15500	11 020 0001 2525 019												
					11 020 0001 2525 017	228	55	52	0	33	17	0	22	33	0.000	0.000	0.000
22	2694	0.878	31.8	5675	11 020 0001 2900 025	233	70	59	0	22	14	0	48	22	0.000	19.200	11.660
23	2696	0.859	31.3	1275	11 020 0001 2898 049	87	29	24	0	15	11	0	14	15	0.000	5.600	7.950
24	2708	1.124	100.0	1683	11 020 0001 2900 017	112	30	25	0	3	6	0	27	3	0.000	11.610	1.770
25	2709	0.672	11.8	1475	11 020 0001 0656 015	6	1	0	0	0	0	0	1	0	0.000	0.070	0.000

CONCLUSIONES

Se ha efectuado la modelación numérica del flujo transitorio bidimensional rápidamente variado producido por la ruptura súbita de cortina de la presa El Palote (Guanajuato, México), para justificar los trabajos de reforzamiento en el cuerpo de la cortina y mejora de las obras de control, así como acciones de conservación en la cuenca vertiente. Dada la longitud de su cortina, se tuvo necesidad de establecer criterios para definir una anchura efectiva de la brecha que se puede formar, esto en función de la ola positiva que se produce ante una falla súbita en un canal de ancho unitario, dada una profundidad inicial de agua.

Se ha propuesto un procedimiento para la cuantificación de daños potenciales que pueden suceder, por causa de la falla, aguas abajo de la presa. A diferencia de la metodología disponible, se hace una estimación que toma en cuenta las gráficas de vulnerabilidad por tipo de vivienda (del CENAPRED), datos del censo de población y

vivienda del INEGI, así como las matrices de resultados de la modelación hidráulica. Con el tirante promedio de inundación por manzana, se determina la fracción de vulnerabilidad y se multiplica por el número de casas censado. El total se alcanza al sumar estos productos por tipo de casa y multiplicar cada subtotal por su valor tipo, ya sea que se haga por zonas o como un importe final.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad de León (SAPAL), Guanajuato (México) haber facilitado el material utilizado para la elaboración del presente artículo.

REFERENCIAS

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, M.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.

Hagen, V.K. (1982). *Evaluation of Design Floods and Dam Safety Proceedings*, 14th Congress of International Commission on Large Dams, Rio de Janeiro.

INEGI (2010). *Resultados del Censo de Población y Vivienda en México, año 2010*, México.

Ministerio de Medio Ambiente (2001). *Guía técnica: Clasificación de presas en función del riesgo potencial*. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas, Ministerio de Medio Ambiente de España.

SAPAL (2017). Mobayed K.N., *Evaluación del impacto urbano por falla de cortina y propuestas de conservación de la Presa El Palote*, Informe técnico, diciembre del 2017, Guanajuato, México.

SEGOB (2011). *Metodología para la elaboración de mapas de riesgo por inundaciones en zonas urbanas*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Serie: Atlas Nacional de Riesgos, México.

Streeter V.L. y Wylie E.B. (1979). *Fluid Mechanics*, Ed. McGraw-Hill, Nueva York, EUA.

WRRL (1998). *Prediction of embankment dam breach parameters. A literature review and needs Assessment*, DSO-98-004, Bureau of Reclamation, Dam Safety Office, Julio 1998.