Recibido: 06.12.2020 • **Aceptado:** 17.04.2021

Palabras clave: Obras hidráulicas, crecientes de diseño.

Tipos de obras hidráulicas y sus crecientes de diseño

DANIEL FRANCISCO CAMPOS ARANDA
campos_aranda@hotmail.com
PROFESOR JUBILADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA, UASLP

El origen de las crecientes

En términos generales, la porción centro-sur de la República mexicana se localiza en la zona de influencia de los ciclones o huracanes que se originan en los océanos Atlántico y Pacífico. La porción norte la afectan los frentes fríos. Ambos fenómenos meteorológicos generan lluvias de gran magnitud que producen crecientes o avenidas máximas, las cuales inundan extensas regiones y ponen en peligro las obras hidráulicas. Ante tal panorama que se repite cada año en diversas zonas del país, resulta evidente la necesidad de estudiar las crecientes para formular medidas de protección y mitigación de los daños sociales, ambientales y económicos que producen sus inundaciones (Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía-Zermeño y Ortega-Gill, 2006).

Tipos de obras hidráulicas

Las obras hidráulicas permiten el aprovechamiento de los recursos hídricos y brindan protección a la sociedad contra sus extremos: crecientes y sequías. Las crecientes son los caudales o gastos máximos (m^3/s) de un río o arroyo y las sequías son los lapsos en los cuales las lluvias y el volumen de escurrimiento (m^3) del río o arroyo disminuye o desaparece.

Las obras hidráulicas de aprovechamiento más importantes son los embalses, desde un punto de vista hidrológico simple se clasifican en grandes y pequeños. Los grandes embalses son decenas, operan de manera multianual y tienen diversos usos. Lo anterior significa que guardan agua de los años húmedos y la aprovechan en los años secos, en riego, usos industriales y urbanos, generación de energía hidroeléctrica, entre otros; además, controlan o reducen las crecientes, por almacenamiento o por el tránsito en su vaso o lago que forman. Debido a su tamaño, su ruptura o colapso origina una catástrofe de enormes proporciones que no puede ser permitida.

En cambio, los embalses pequeños son miles, su operación es anual y por lo general tienen un único propósito: el riego. Guardan agua de la época de lluvias y la utilizan en el siguiente estiaje. Su ruptura o colapso causaría una gran destrucción local, por lo tanto debe ser evitada.

Las principales obras hidráulicas de protección son los diques o muros de contención, los cuales evitan el desbordamiento del río en sus planicies de inundación y permiten el uso agrícola o recreativo de tales áreas. Generalmente acompañan a estas obras las rectificaciones y canalizaciones. Los puentes son obras de cruce de carreteras y ferrocarriles y su dimensionamiento hidrológico correcto evita su destrucción o los daños superficiales o laterales en el terraplén de la carretera o ferrocarril, debido a su tamaño reducido.

También son obras hidráulicas de protección todas las estructuras del drenaje urbano y las presas de control de crecientes y las presas rompepicos. Las primeras almacenan la creciente de diseño de manera temporal y la liberan con un gasto pequeño; las segundas la reducen debido a su tránsito en su vaso de almacenamiento.

Tipos de crecientes de diseño y periodo de retorno

El proceso de estimación del impacto posible de los eventos hidrológicos extremos en una obra hidráulica y la selección de sus dimensiones y de la política de operación para su funcionamiento correcto, se conoce como diseño hidrológico. El concepto asociado a las obras hidráulicas para evitar daños que lleven a su ruptura o colapso, se denomina seguridad hidrológica (Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía-Zermeño y Ortega-Gill, 2006). Existen otros conceptos asociados a la seguridad estructural y al funcionamiento hidráulico, pero están fuera del alcance de este artículo.

Para el caso de los diques o muros de contención, el dimensionamiento hidrológico de los puentes y algunas obras del drenaje urbano se basa exclusivamente en el caudal o gasto máximo (X) asociado a una baja probabilidad de ser excedido o creciente de diseño. El concepto clásico de probabilidad de un evento, se define como el cociente del número de casos favorables (*ncf*) a tal evento, entre el número de casos posibles (*ncp*) a dicho evento, por ello varía de cero a uno. Debido al manejo anual de los datos de la variable X, la probabilidad de excedencia $F'_X(x)$ se corresponde con el recíproco del periodo de retorno (T_X) en años; ya que en cada año se tiene, *ncf* =1 y *ncp* = TX; por lo cual, se tiene:

(1)

$$T_X = \frac{1}{F'_x(x)} = \frac{1}{1 F_X(x)}$$

En la expresión anterior, $FX(x)$ es la probabilidad de no excedencia que se estima con el modelo probabilístico utilizado para realizar las predicciones buscadas o crecientes de diseño.

En cambio, para todos los embalses, estanques urbanos, presas de control y rompepicos, su dimensionamiento hidrológico requiere el hidrograma de la creciente de diseño, ya que su funcionamiento y desempeño es diferente, si el hidrograma es esbelto (gasto pico grande y volumen escaso) o aplanado (gasto pico bajo y gran volumen). El hidrograma de la creciente es la gráfica que define la evolución en el tiempo (abscisas) del gasto o caudal (ordenadas). Tiene cuatro características o variables básicas: gasto pico, volumen (área bajo el hidrograma), tiempo al gasto pico y duración total.

Estimación de las crecientes de diseño univariadas

Los métodos hidrológicos de estimación de crecientes se dividen en dos grandes grupos: hidrometeorológicos y probabilísticos. Los primeros se aplican por subcuencas y utilizan los datos de lluvia de las estaciones pluviográficas y pluviométricas para definir las tormentas de diseño, las cuales se transforman en gastos o caudales, mediante la modelación matemática del proceso lluvia-escurrimiento. Los hidrogramas parciales se trasladan e integran el hidrograma buscado.

Los métodos probabilísticos son más confiables y exactos, pero requieren datos de las crecientes máximas anuales observadas en el sitio del proyecto. Cuando sólo procesan datos de los caudales o gastos máximos anuales, esta técnica estadística se conoce como análisis de frecuencias de crecientes (AFC) y consiste en representar al registro disponible de gastos máximos anuales por una función de distribución de probabilidades (FDP), con base en tal modelo probabilístico se realizan las inferencias buscadas o predicciones de un determinado periodo de retorno.

El AFC consta de los siguientes cuatro pasos: *1)* verificación de la calidad estadística del registro disponible de crecientes; *2)* selección de una FDP; *3)* adopción de un método de estimación de los parámetros de ajuste de la FDP, comúnmente el método de momentos, el de máxima verosimilitud o el de los momentos L y *4)* contraste de las diversas FDP ajustadas y de su método de estimación de parámetros, para seleccionar la más conveniente a los datos disponibles. Esto último, generalmente se realiza a través de los errores estándar de ajuste y absoluto medio.

Estimación de las crecientes de diseño bivariadas

Como ya se indicó, una creciente es un evento hidrológico extremo multivariado. Al respecto, se ha demostrado que los embalses no son sensibles al valor del tiempo, al gasto pico y que la duración total está relacionada con el volumen (V); de manera que estas dos variables (Qp y V) son suficientes para definir, de manera aproximada, el hidrograma de la creciente de diseño.

Lógicamente, el análisis bivariado de las crecientes es el más simple del enfoque multivariado y, sin embargo, conlleva diversas complicaciones matemáticas: *1)* se requiere emplear una FDP bivariada; 2) su validación requiere la estimación de las probabilidades empíricas bivariadas; 3) ahora existen probabilidades conjuntas y condicionales y 4) hay que definir un periodo de retorno conjunto, para el cual existen infinitas parejas de valores de Qp y V que lo satisfacen.

Modelos probabilísticos bivariados

La primera distribución bivariada utilizada fue la normal, definida según su función de densidad de probabilidad (fdp) (Yue, 1999):

(2)

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-p^2}}\exp\left[-\frac{q}{2}\right] \quad -1<p<+1$$

siendo:

(3)

$$q=\frac{1}{1-p^2}\left[\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)-2p\left(\frac{x-\mu_x}{\sigma_x}\right)\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)+\left(\frac{y-\mu_y}{\sigma_y}\right)^2\right]$$

donde, μ_x, μ_y, σ_x y σ_y son las medias y desviaciones estándar de las variables normales *X* y *Y*, que se estiman con el método de momentos. El coeficiente de correlación entre *X* y *Y* es *ρ* y se estima con la expresión:

(4)

$$p=\frac{E\left[(x-\mu_x)(y-\mu_y)\right]}{\sigma_x\ \sigma_y}$$

Para estimar la probabilidad de no excedencia conjunta *F(x,y)* asociada a un par de datos *X* y *Y*, primero se deben transformar en variables normales *Qp* y V, después deben calcularse los cinco parámetros de ajuste (μ_x, σ_x, μ_y, σ_y, ρ), para realizar la integral doble de cero a *X*, *Y* de la ecuación 2. Tal integración se lleva a cabo numéricamente (Yue, 1999), debido a que no existe solución explícita.

La siguiente distribución bivariada que se ha aplicado en el AFC conjunto, fue la que tiene marginales tipo Gumbel o doble exponencial (Shiau, 2003; Yue y Rasmussen, 2002). Este modelo probabilístico es explícito, ya que está definido según su FDP conjunta, esta es:

(5)

$$F(x,y)=\exp\left\{-\left[(-\mathrm{In}F_x(x))^m+(-\mathrm{In}\,F_y(y))^m\right]^{1/m}\right\} \quad (m\leq 1)$$

donde, *Fx*(*x*) y *Fy*(*y*) son las FDP marginales de las variables aleatorias *X* y *Y*, cuyas expresiones son:

(6)

$$F_X(x)=\exp\left[-\exp\left(-\frac{x-u_x}{a_x}\right)\right] \qquad (x\leq 0)$$

(7)

$$F_Y(y)=\exp\left[-\exp\left(-\frac{y-u_y}{a_y}\right)\right] \qquad (y\leq 0)$$

siendo, *u* y *a* los parámetros de ubicación y escala de cada distribución Gumbel; sus expresiones de acuerdo con el método de momentos, en función de la media (M) y desviación estándar (S) insesgada de la muestra o registro de Qp y V, son:

(8)

$$a=0.7797\cdot S$$

(9)

$$u = M - 0.5772 \cdot a$$

Por último, m es el parámetro de asociación que describe la dependencia entre las dos variables aleatorias, su expresión es:

(10)

$$m = \frac{1}{\sqrt{1-p}} \quad (0 \leq p \leq 1)$$

Verificación de las distribuciones marginales

En la distribución normal bivariada, al utilizar registros de Qp y V que no tengan valores extremos dispersos ni presencia de dos poblaciones mezcladas, la transformación potencial garantiza que sigan el modelo normal de las marginales. En cambio, para la distribución Gumbel bivariada es necesario verificar previamente que los registros de Qp y V aceptan tal modelo. Al dibujarlos en el papel de probabilidad Gumbel-Powell, usando la ecuación 11, deben definir una línea recta de manera aproximada.

Estimación de probabilidades empíricas

Las probabilidades empíricas univariadas y bivariadas se estimaron con base en la fórmula de Gringorten (ecuación 11), la cual conduce a probabilidades de no excedencia (p) insesgadas para la distribución Gumbel. Tal fórmula es:

11)

$$p = \frac{i - 0.44}{n + 0.12}$$

en la cual, i es el número de cada dato, cuando están ordenados de manera progresiva y n es el número total de ellos, o amplitud en años del registro procesado de Qp y V.

Para la estimación de las probabilidades empíricas bivariadas, se siguió el mismo principio que aplica para la ecuación 11, pero se trabajó en el plano bidimensional, con los datos ordenados en forma progresiva; los gastos pico (Qp) en los renglones y los volúmenes (V) en las columnas. El plano formado es un cuadrado de n por n casillas, con n casillas en su diagonal principal, cuando el número de orden del renglón es igual al de la columna. Después cada pareja de datos anual (Qp y V) se localiza en el plano bidimensional y la casilla definida por la intersección del renglón y columna, se identifica con el número i que corresponde al año histórico dibujado.

Cuando las n parejas de datos están dibujadas, se busca el año 1 y se define un área rectangular o cuadrada de valores menores de Qp y de V, cuyo conteo de casillas numeradas dentro es NM1 o combinaciones de Qp y V menores. Calculados los n valores de NM_I, se aplica la fórmula de posición gráfica de Gringorten, para calcular la probabilidad conjunta empírica:

(12)

$$F(x,y) = P(Q \leq q, V \leq v) = \frac{NM_i - 0.44}{n + 0.12}$$

Validación de la distribución bivariada

La relación entre las probabilidades conjuntas teóricas (ecuación 2 ó 5) y las empíricas (ecuación 12) del *Qp* y el *V*, permiten definir la validez de la distribución bivariada propuesta. La forma más simple de representarlas consiste en llevar al eje de las abscisas la probabilidad de no excedencia empírica y en el eje de las ordenadas la teórica; lógicamente cada pareja de datos define un punto que coincide o se aleja de la recta a 45º. La inspección de la gráfica descrita y el valor del coeficiente de correlación, en estos casos, superior a 0.98, ratifican la validez del modelo probabilístico conjunto utilizado.

El test de Kolmogorov–Smirnov con un nivel de significancia (α) del 5 por ciento, permite aceptar o rechazar la máxima diferencia (*dif*) entre las probabilidades conjuntas. Para evaluar la estadística (D_n) del test, la cual es función del número de datos (*n*), se utiliza la expresión siguiente (Meylan, Favre, y Musy, 2012):

13)

$$D_n = \frac{1.358}{\sqrt{n}}$$

Si *dif* es menor que D_n se acepta el modelo probabilístico conjunto propuesto.

Periodo de retorno conjunto

Validada la distribución bivariada, puede estimarse el periodo de retorno conjunto del evento (*X*, *Y*), que está asociado al caso en que ambos límites son excedidos (*X>x, Y>y*), su ecuación es (Aldama, Ramírez, Aparicio, Mejía-Zermeño y Ortega-Gill, 2006; Shiau, 2003; Yue y Rasmussen, 2002):

(14)

$$T'(x, y) = \frac{1}{F'(x,y)} = \frac{1}{1 F(x,y) - F_x(x) - F_y(y)}$$

La aplicación de la fórmula anterior requiere el uso de las ecuaciones 5 a 10, en caso de aplicar la distribución Gumbel bivariada; de menor complejidad numérica.

Eventos de diseño

Como ya se indicó, el AFC bivariado conduce a través de la ecuación 14 del *T'(x,y)*, a una infinidad de combinaciones de gasto pico y volumen que generan el mismo periodo de retorno conjunto y por ello, existen muchas crecientes o hidrogramas que producirán diferentes efectos en el embalse que se diseña o revisa; se adoptará por seguridad, el que genere las condiciones más críticas, severas o desfavorables (Aldama, Ramírez,

DANIEL FRANCISCO CAMPOS ARANDA

Realizó el Doctorado en Ingeniería con especialidad en Aprovechamientos Hidráulicos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Obtuvo la medalla Gabino Barreda que otorga la UNAM y el Premio Nacional Francisco Torres H. de la Asociación Mexicana de la Hidráulica. Es profesor jubilado de la UASLP.

Aparicio, Mejía-Zermeño y Ortega-Gill, 2006). Lo anterior, debido a las diferentes características físicas del vertedor y vaso de cada embalse. Para formar el hidrograma, conociendo los valores de *Qp* y *V*, existen diversos métodos teóricos y empíricos.

A manera de conclusión

En nuestro país, por su localización geográfica ocurren anualmente crecientes severas en diversas regiones, las cuales generan daños y ponen en peligro a las obras hidráulicas de aprovechamiento y de protección.

Las obras hidráulicas de protección, como los diques o muros de contención, los puentes y algunas estructuras del drenaje urbano, se dimensionan hidrológicamente con base en las crecientes de diseño, que son caudales o gastos máximos del río o arroyo asociados a bajas probabilidades de ser excedidos; es decir, altos periodos de retorno. Se estiman con el AFC univariado.

En cambio, todos los tipos de embalses y de presas de control de crecientes, se diseñan hidrológicamente por medio del hidrograma de la creciente de diseño, el cual puede ser definido a través del AFC bivariado, procesando registros de gasto pico y volúmenes de las crecientes anuales, de forma conjunta.

Adoptado el periodo de retorno conjunto de acuerdo con la magnitud y peligrosidad del embalse, se estiman decenas de parejas de gasto pico y volumen anual de las crecientes que lo cumplen y con cada una se construye un hidrograma, que al transitarlo por el embalse define niveles y descargas factibles de ocurrir, así que se seleccionan las condiciones más extremas, severas o desfavorables. De esta manera se incorporan en el diseño hidrológico las características físicas del embalse bajo estudio o revisión.

Referencias bibliográficas:

Aldama, A. A., Ramírez, A. I., Aparicio, J., Mejía-Zermeño, R. y Ortega-Gil, G. E. (2006). *Seguridad hidrológica de las presas en México*. Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Meylan, P., Favre, A. C. y Musy, A. (2012). Validation of the model. En Meylan, P., Favre, A. C. y Musy, A. (Eds.) Predictive Hydrology. *A Frequency Analysis Approach*, (pp. 103-117). Florida: CRC Press. Boca Raton.

Shiau, J. T. (2003) Return period of bivariate distributed extreme hydrological events. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *1*(1-2), pp. 42-57.

Yue, S. (1999) Applying Bivariate Normal Distribution to Flood Frequency Analysis. *Water International*, *24*(3), pp. 248-254.

Yue, S. y Rasmussen, P. (2002) Bivariate Frequency Analysis: Discussion of Some Useful Concepts in Hydrological Application. *Hydrological Processes*, *16*(14), pp. 2881-2898.