

CURSO DE INGENIERÍA DE RIEGO

APUNTES DE CLASES

Prof. Sr. Luis Arrau del C.

TEMA: CALCULO DE CRECIDAS.

En hidrología, se entiende por crecidas a los grandes caudales que, en forma eventual o esporádica, se producen en un cauce como consecuencia de una lluvia o de un deshielo. En el primer caso se denominan crecidas pluviales y en el segundo, crecidas nivales o de deshielo.

El análisis de las crecidas tiene por objetivos principales la protección contra inundaciones y las protecciones de las obras de infraestructura que es necesario construir en los cauces, de manera de optimizar y asegurar los diseños.

La optimización de un diseño corresponde a un problema de riesgos aceptables vs. costos. Es así como un embalse mayor que se ubica aguas arriba de una ciudad, por ejemplo, tiene que poseer una seguridad total. En cambio, una obra cuya destrucción no causa otro tipo de daños que su pérdida, puede diseñarse ahorrando todos los costos que se desee, según los riesgos de pérdidas que se esté dispuesto a asumir. En consecuencia, es necesario evaluar los riesgos asociados y para ello es fundamental determinar para una cierta frecuencia de ocurrencia de las crecidas, sus características de caudal máximo, forma del hidrograma, tipo de escurrimiento hidráulico para evaluar las fuerzas de arrastre y socavación, etc.

Así planteado, el problema es de tipo probabilístico, para lo cual se definen los siguientes conceptos:

T = Período de Retorno: Corresponde al intervalo de tiempo promedio en que la crecida de una cierta magnitud es igualada o excedida. Normalmente, la unidad de tiempo es el "año".

P_{exc} = Probabilidad de excedencia: Corresponde a la probabilidad de que un evento definido, o caudal de crecida, sea igualado o excedido.

Así definidos, se cumple la relación : $P = 1 / T$

Existen numerosas fórmulas empíricas para calcular P o T a una serie de valores estadísticos, sin que haya un criterio unánime acerca de cual utilizar. A continuación, se indican algunas de ellas:

Nombre	Año	Período de Retorno	Prob. de Excedencia
California	1923	N/m	m/N

Hazen	1930	$2N/(2m-1)$	$(2m-1)/2N$
Weibull	1939	$(N+1)/m$	$m/(N+1)$

En las fórmulas, N representa el número total de elementos de una serie y m el número de orden de la serie ordenada en forma decreciente.

Si se tiene una estadística de caudales máximos anuales (un valor por año), por ejemplo, se puede calcular en la forma indicada la probabilidad de excedencia o el periodo de retorno de cada elemento. Sin embargo, interesa por lo general determinar cuales son los valores de las crecidas que corresponden a un período de retorno alto, por ejemplo 1000 años para un vertedero importante, o 100 años para una obra de protección contra inundaciones, etc. Como las estadísticas no siempre son tan largas, se recurre a suponer que estas estadísticas corresponden a una "muestra" representativa de un "universo", y se aplican tratamientos estadísticos a la muestra para obtener los valores deseados. Para el caso de no contarse con estadísticas apropiadas de caudales, que permitan efectuar un análisis de frecuencia directo, numerosas son las fórmulas empíricas y métodos que se han desarrollado con el fin de calcular crecidas a partir de la información de precipitaciones. En Figura N°5.1 se resumen los más importantes.

CLASIFICACIÓN GENERAL
MÉTODOS DE CALCULO
CRECIDAS DE DISEÑO

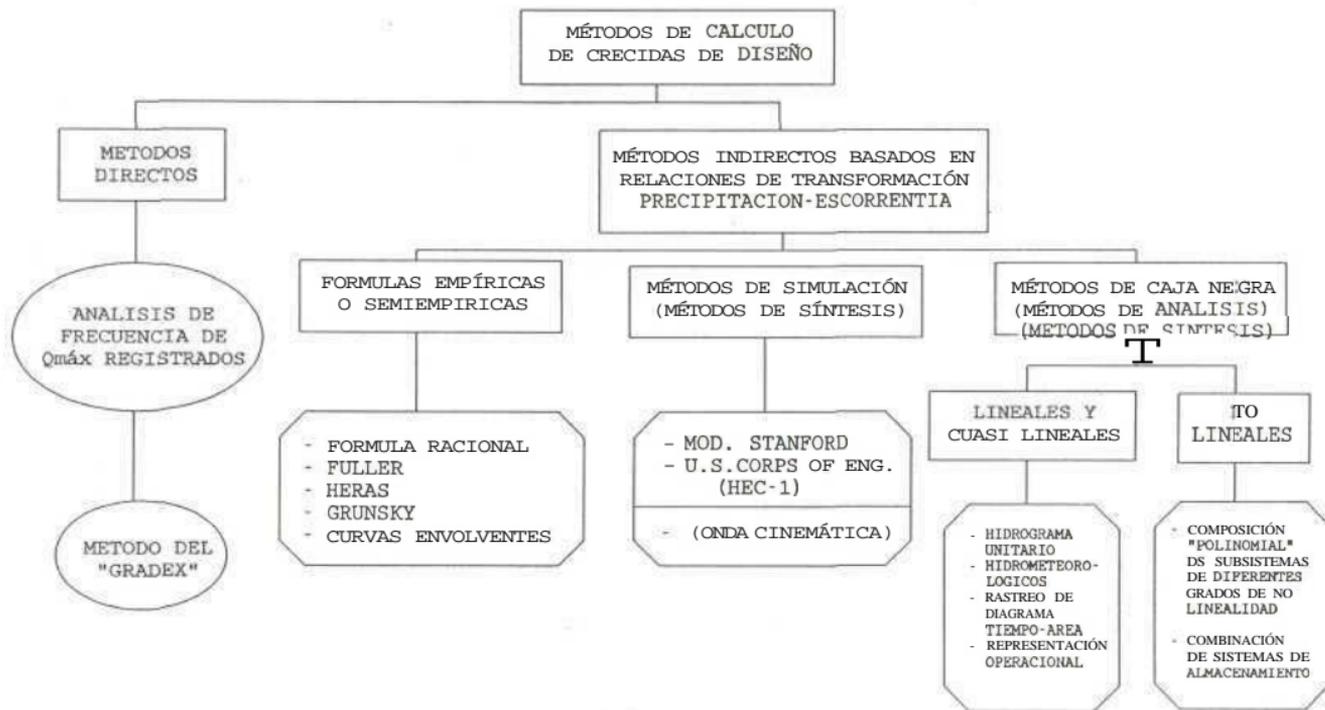


Figura No. 5.1

1.- Análisis de Frecuencia de Caudales.

Se presentan a continuación algunas de las funciones de distribución más utilizadas en el análisis de frecuencia de crecidas. Dos de ellas tienen la ventaja de poder presentarse en forma gráfica, lo que permite visualizar directamente la adaptabilidad de la función de distribución, entre otras ventajas.

1.1. Distribución Normal y Log Normal.

$$z_{\alpha} = (x - \mu) / \sigma = f(T)$$

De tabla : $a = P_{exc} = 1/T \implies z_{\alpha}$
 μ y a de la muestra:

$$\mu = 1/N \sum_{i=1}^N x_i$$

$$\sigma = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

1.2. Distribución Gumbel.

$$x = x_0 + (1/a) y$$

$$x_0 = x - (1/a) y$$

$$(1/a) = (S_x/S_y)$$

$$X = 1/N \sum_{i=1}^N x_i$$

$$S_x = \sqrt{1/N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

De tabla, en función de N:

$$\bar{y}, S_y - x_0, (1/a)$$

$$y = -\ln[\ln T - \ln(T-1)] \rightarrow x=f(T)$$

6.1.3. Log Pearson Tipo III.

$$\log x = \bar{x} + \sqrt{V}K$$

$$K = f(T, C_p) \quad (\text{de tabla})$$

$$C_p = \frac{[N^2 (\sum x^3) - 3N(\sum x^2) (\bar{E}x) + 2 (\sum x)^3]}{N(N-1)(N-2) V^{3/2}}$$

$$V = \frac{1}{N-1} \sum x^2 - \frac{1}{N(N-1)} (\sum x)^2$$

en que : $x_i = \log y_i$ y_i : muestra

1.4. Función de Distribución de IWAI.

Se trata de calcular x para un $T = 1/\alpha$. Dado un periodo de retorno T deseado, se calcula a y de la tabla de la distribución normal, se calcula z_α , que en este caso corresponde a μ :

$$\log (x + b) = \log (x_0 + b) + (\mu / a)$$

$$\frac{I}{a} = \sqrt{\frac{N}{N-1}} S_y$$

$$S_y = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\log (x_i + b))^2 - (\log (x_0 + b))^2 \right]^{1/2}$$

$$\log (x_0 + b) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log (x_i + i)$$

Para calcular "b" :

$$A = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m b_s$$

$$b_s = \frac{x_{1x_s} - v}{2x_s - (x_1 + x_s)}$$

en que: $m = N/10$, $1 = N-s+1$ (orden desde el mínimo hacia arriba)

$$\log x_g = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log x_i$$

2.- Fórmulas de Estimación en base a Datos de Precipitación.

2.1. Caudal Peak.

2.1.1. La Fórmula Racional.

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas y semi-empíricas para determinar gastos máximos en base a la intensidad de lluvia. Una de estas fórmulas, cuyo uso se ha generalizado bastante es la fórmula "racional", que tiene la siguiente expresión.

$$Q_{\text{máx}} = C * I * A$$

en que:

$$\frac{Q_{\text{máx}}}{C} =$$

gasto máximo en l/s
coeficiente de escorrentía, que expresa la relación entre el gasto máximo por unidad de área y la intensidad media máxima de la lluvia durante un período de tiempo igual al tiempo de concentración de la cuenca (representa, por lo tanto, el porcentaje de lluvia que puede escurrir).

- I intensidad media máxima de la lluvia en l/s/ha (1 mm/hora = 2,78 l/s/ha) durante el tiempo de concentración de la cuenca.
- A = superficie de la cuenca en hectáreas

Se define como tiempo de concentración de la cuenca, al mayor tiempo que demora en llegar al punto donde se está calculando el gasto, la partícula de agua que cae más alejada de dicho punto.

La "fórmula racional" está basada en una serie de hipótesis que la limitan y que es necesario tener en cuenta al utilizarla. Dichas hipótesis son las siguientes:

- a) Se supone que el gasto máximo, que produce cierta intensidad de lluvia, ocurre cuando dicha intensidad (media) se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca, ya que sólo entonces estaría contribuyendo toda la cuenca a la escorrentía.
- b) La relación lluvia - gasto es lineal.
- c) La máxima intensidad de lluvia ocurre dentro del período o tiempo de concentración.
- d) La probabilidad de ocurrencia de los gastos máximos es la misma que la de las intensidades de lluvia correspondientes.
- e) El coeficiente de escorrentía de una cuenca es independiente del tipo y probabilidad de la lluvia.

Estas hipótesis limitan el uso del método a cuencas relativamente pequeñas, preferentemente urbanas y de superficies en lo posible no mayores de 15 km². A pesar de estas limitaciones y de otras que se analizarán al tratar cada uno de los términos de la "fórmula racional", la experiencia acumulada en su uso y los parámetros que intervienen, la simpleza de la relación y la posibilidad de aplicar la experiencia y criterio del proyectista, ha representado un avance positivo en la evaluación del gasto de diseño, cuando este método se aplica en los casos que corresponde y teniendo plena conciencia de sus limitaciones e hipótesis.

Se tratan a continuación cada uno de los términos que intervienen en la "fórmula racional" y se explica cómo se eligen y determinan para la aplicación del método.

i) Determinación del coeficiente de escorrentía.

El coeficiente de escorrentía es el elemento menos susceptible de una determinación precisa y para su elección se requiere un conocimiento detallado del área, así como una considerable experiencia y juicio práctico. Este coeficiente debe tener en cuenta, implícitamente, una diversidad de factores tanto climáticos como fisiográficos que influyen en la relación lluvia - gasto. Estos factores se refieren a los siguientes aspectos: pérdidas por intercepción de la lluvia por la vegetación; pérdidas a la escorrentía superficial debido a la relación entre la capacidad de infiltración del suelo y la intensidad de la lluvia, pérdidas por evaporación y evapotranspiración. En la realidad, por lo tanto, el coeficiente de escorrentía no sólo varía según las condiciones climáticas y estacionales sino que dentro del periodo de una determinada lluvia. sin embargo, en la práctica, comúnmente se utilizan coeficientes constantes que sólo dependen del tipo de terreno. En la determinación de coeficientes de escorrentía para la aplicación del método en cuencas agrícolas pequeñas (menos de 15 km²) se pueden utilizar los valores de la Tabla N° 1.

TABLA N° 1

Coefficientes de Escorrentía en Cuencas Agrícolas Pequeñas

(Fuente: "Handbook of Applied Hydrology", Ven Te Chow).

Tipos de Suelos	Coeficiente de Escorrentía		
	Terrenos Cultivados	Praderas	Terrenos Boscosos
Suelos arenosos o con altas tasas de infiltración	0,20	0,15	0,10
Suelos francos o limosos con tasas de infiltración medias	0,40	0,35	0,30
Suelos arcillosos o con estratos endurecidos (panes) cercanos a la superficie, o suelos poco profundos sobre roca; suelos con tasas de infiltración bajas	0,50	0,45	0,40

Se han propuesto métodos para tener en cuenta las condiciones iniciales de la cuenca (estado de humedad de los suelos, etc.) y una modificación del coeficiente de escorrentía dentro de una lluvia, pero el tipo de información que se requiere (configuración espacial y temporal de la lluvia de diseño, zonificación de los tiempos de concentración dentro de la cuenca, características de la cuenca) no se dispone usualmente en la práctica y lo laborioso e incierto de los procedimientos no justifica estos cambios, por lo general no significativos.

ii) Determinación de la intensidad de la lluvia.

Como ya se indicó, el método de la "fórmula racional" presupone que el gasto máximo es producido por aquella intensidad de lluvia que se mantiene por lo menos durante un período igual al tiempo de concentración de la cuenca.

Para elegir la intensidad de lluvia de diseño, se pueden utilizar procedimientos hidrológicos complejos, tales como el método de las curvas de intensidad - duración - frecuencia generalizadas, o el de los coeficientes generalizados. Sin embargo, es común el uso de registros de precipitaciones máximas en 24 horas, para hacer un análisis de frecuencia con ellas, y utilizar una fórmula empírica que calcula la intensidad media de lluvia para la duración de interés, tal como la relación de Grunsky:

$$I_t = I_{24} \sqrt{24/D}$$

en que:

$$\begin{aligned} I_{24} &= \text{intensidad media en 24 horas} \\ I_t &= \text{intensidad media en } t \text{ horas} \\ D &= \text{duración considerada de la lluvia (horas)} \end{aligned}$$

iii) Tiempo de concentración.

Para la estimación del tiempo de concentración, puede recurrirse a fórmulas empíricas, o bien a las velocidades medias estimadas. Se presentan a continuación 2 fórmulas para el primer caso y dos tablas para el segundo:

Fórmula de Giandotti:

$$t_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 L}{0,8\sqrt{H}}$$

en que: t_c = tiempo de concentración, en horas
S = superficie de la cuenca, en km²
L = longitud del cauce principal, en km
H = altura media de la cuenca sobre el punto de interés, en m

Adicionalmente, se debe verificar que $L/3,6 \geq t_c \geq L/5,4$

Fórmula de "California Highways and Public Works":

$$t_c = 0,95 \left(\frac{L^2}{H} \right)^{0,385}$$

en que: t_c = tiempo de concentración, en horas

L = longitud del cauce principal, en km
 H = diferencia de elevación, en metros, entre el comienzo del cauce principal y el punto estudiado

Para el cálculo de las velocidades promedio, la US Navy publicó en 1953 la siguiente tabla:

Pendiente promedio del cauce principal en porcentaje	Velocidad promedio (m/s)
1 a 2	0,6
2 a 4	0,9
4 a 6	1,2
6 a 10	1,5

Por su parte, en 1946, el Texas Highway Department publicó la tabla siguiente:

Pendiente (%)	Velocidad Promedio (m/s)		
	Zonas de bosques en partes altas de las cuencas	Zonas con poca vegetación en partes altas de las cuencas	Cauce natural no muy bien definido
0 a 3	0,30	0,45	0,30
4 a 7	0,60	0,90	0,90
8 a 11	0,90	1,20	1,50
12 a 15	1,05	1,35	2,40

6.2.1.2. Fórmula de Verni y King.

Esta fórmula ha sido estudiada para una gran cantidad de cuencas de la zona centro sur de Chile, observándosele un error promedio del 18% entre las latitudes 32°S y 39°S. Para otras zonas, puede ser adaptada a partir de una verificación a base de estaciones con registros de crecidas.

$$Q = 0,00615 P^{1,24} S^{0,88}$$

en que:

- P = Precipitación media sobre la cuenca, para el período de retorno deseado
- S = Superficie de la cuenca, en km²
- Q = Caudal peak,, en m³/s

2.2. Hidrograma de la Crecida.

La forma del hidrograma depende de variados factores, geomorfológicos, topográficos y otros, pero fundamentalmente de la forma como se ha presentado en el tiempo y en el espacio la lluvia efectiva, que es la lluvia que contribuye a la crecida sin infiltrar. Métodos como el del hidrograma unitario permiten resolver el problema considerando todos estos aspectos y entregar el hidrograma completo de la crecida, pero su aplicación requiere de un laborioso proceso de análisis de todos ellos. Para los efectos prácticos de dar una forma al hidrograma después de haber calculado el caudal peak mediante fórmulas empíricas, sin pasar por mayores análisis, se puede recurrir a la forma del hidrograma unitario sintético, para lo cual se tiene la siguiente fórmula:

$$t_p = C_t \left(\frac{L \bar{L}}{\sqrt{S}} \right)^n = C_t K^n$$

en que:

- L = longitud de la cuenca a lo largo de su cauce principal, en km
- \bar{L} = distancia en km, entre la sección de salida de la cuenca y su entro de gravedad
- S = pendiente media de la cuenca, en tanto por uno
- n = coeficiente que varia entre 0,35 y 0,38
- C_t = coeficiente que varia entre 0,24 para los valles y 0,83 para zonas montañosas

También se pueden determinar n y C_t en base a un estudio regional de cuencas controladas, estableciendo una correlación entre $\log t_p$ y $\log K$.

Así definido t_p , que corresponde al tiempo de desfase, en horas, entre el centro de masas del hietograma y el caudal peak, se calcula el hidrograma de acuerdo con la Tabla N°2.

Tabla N22
 Coordenadas adimensionales del Hidrograma, Q/Q_p

Tabla N ^o 6.2: Coordenadas adimensionales del Hidrograma, Q/Q_p			
t/t_p	Commons	William	S.C.S. (*)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,25	0,15	0,08	0,13
0,50	0,50	0,35	0,44
1,00	1,00	1,00	1,00
1,25	0,83	0,82	0,84
1,50	0,60	0,60	0,62
2,00	0,23	0,35	0,30
2,50	0,15	0,24	0,15
3,00	0,11	0,16	0,06
3,50	0,10	0,12	0,03
4,00	0,09	0,09	0,015

(*) : Soil Conservation Service