

4. CAUDAL MÁXIMO DE UNA CUENCA UNITARIA

4.1. Introducción

Una parte importante de los estudios hidrológicos de crecidas requieren exclusivamente el valor del caudal máximo de diseño, pues dada la escasa laminación producida por el elemento en estudio (drenaje transversal, encauzamiento, etc) no presenta interés la estimación del hidrograma completo.

En estos casos, el método racional resulta sumamente adecuado y debido a su sencillez es mayoritariamente empleado. Según trabajos de recopilación llevados a cabo por Pilgrim (1986), el método racional es el seleccionado en un 90 % de los casos en países como por ejemplo Gran Bretaña, Canadá o Australia.

4.2. Método racional

En un aguacero ideal, de duración indefinida, con intensidad de lluvia neta E constante, el caudal Q en el punto de desagüe de la cuenca, que al principio solo acusará la presencia del agua caída en sus proximidades, irá creciendo hasta alcanzar una situación de equilibrio. En ese momento, la intensidad de salida de agua se igualará con la de entrada en la cuenca y por tanto:

$$Q = EA \quad (4.1)$$

siendo A la superficie total de la cuenca, estabilizándose el caudal a partir de entonces.

La intensidad de lluvia neta E será igual a la de la lluvia total I , si el terreno es totalmente impermeable. En los casos reales:

$$\frac{E}{I} = C < 1 \quad (4.2)$$

siendo C el coeficiente de escorrentía.

El caudal máximo será el de equilibrio y valdrá por tanto:

$$Q = EA = CIA \quad (4.3)$$

en unidades acordes. Como las unidades habituales son:

$$Q : \text{m}^3 / \text{seg}$$

$$I : \text{mm} / \text{h}$$

$$A : \text{Km}^2$$

la ecuación adopta la expresión clásica del método racional:

$$Q = \frac{CIA}{3.6} \quad (4.4)$$

Suponiendo un aguacero de duración indefinida, sería suficiente un determinado tiempo T_c (característico de cada cuenca) para alcanzar un máximo igual al caudal de equilibrio. Este tiempo T_c o tiempo de concentración, se define en el método racional como el transcurrido desde el final de aguacero hasta el final de su hidrograma superficial, según se indicó en el apartado 3.3.2.

De este modo, el máximo caudal originado por un aguacero estará constituido por agua precipitada exclusivamente dentro de un mismo intervalo de

duración T_c . Si la lluvia neta ($C I$) en este lapso tiene lugar con intensidad constante, el caudal punta se podrá calcular por la fórmula racional ya mencionada.

Entre todos los lapsos del aguacero de duración T_c , el suministrador del caudal punta será aquel que proporcione la máxima lluvia neta ($C I$). Se suele admitir que coincide con el máximo valor de I y por tanto, el cálculo de caudales punta en el método racional se reduce al de los valores extremos de la intensidad media (I) de precipitación en los intervalos de duración T_c y al valor del coeficiente de escorrentía (C) que cabe esperar en esos mismo intervalos.

La sencilla formulación del método racional lo hace muy atrayente como lo muestran las múltiples versiones que tratan de resolver sus puntos más conflictivos:

- hipótesis restrictiva de lluvia neta constante a lo largo del intervalo de duración igual al T_c .
- adecuada definición del coeficiente de escorrentía para hacerlo depender de las variables más representativas.

En el presente trabajo, se va a resumir la formulación propuesta por Témez (1991) que modifica ligeramente la versión propuesta en la actual Instrucción 5.2 - IC. (MOPU, 1990) para ampliar su campo de aplicación a cuencas de hasta 3000 Km² y tiempos de concentración, definidos según la expresión (3.37), comprendidos entre 0,25 h y 24 h. Esta metodología presenta interesantes aportaciones en lo referente a la consideración del efecto de no uniformidad de las lluvias y a la adecuada estimación del coeficiente de escorrentía. Conviene resaltar, que si bien la formulación ha sido desarrollada en un sentido estadístico para obtener leyes de frecuencia de caudales a partir de leyes de frecuencia de

precipitaciones diarias, en este apartado se va a desarrollar principalmente los aspectos referentes al proceso lluvia - escorrentía para facilitar su integración en el conjunto del documento. En posteriores apartados se expondrán con mayor detalle los aspectos referentes a su empleo estadístico, de forma que aunque así se dificulte la comprensión completa del método, se vea por contra favorecido la comprensión del presente documento en su totalidad.

4.3. Formulación propuesta

La hipótesis de lluvia neta constante admitida en la expresión (4.4) no es real y en la práctica existen variaciones en su reparto temporal, que favorecen el desarrollo de los caudales punta.

El fenómeno se hace en estas circunstancias más complejo y resulta difícil obtener directamente de su análisis una fórmula que dé los máximos del caudal.

Sin embargo, esta influencia de la variación de la lluvia neta dentro de la duración de su tiempo de concentración se puede reflejar globalmente refiriendo los caudales punta de estos casos al homólogo en la hipótesis de intensidad de lluvia neta constante. Si se denomina K al cociente entre ambos, resulta la ley:

$$Q = \frac{CIA}{3.6} K \quad (4.5)$$

en la que:

- Q (m³/seg.) = Caudal punta
- I (mm/h.) = Máxima intensidad media en el intervalo de duración T_c
- A (Km²) = Superficie de la cuenca
- C = Coeficiente de escorrentía del intervalo donde se produce I
- K = Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad K varía de unos episodios a otros, pero su

valor medio en una cuenca concreta depende fundamentalmente del valor de su tiempo de concentración, y de forma tan prevalente que a efectos prácticos puede desprejiciarse la influencia de las restantes variables tales como la torrencialidad del clima, etc.

Para su estimación, en valores medios, se propone la siguiente expresión:

$$K = 1 + \frac{T_c^{1.25}}{T_c^{1.25} + 14} \quad (4.6)$$

obtenida a partir de comprobaciones empíricas realizadas en diversas estaciones de aforos nacionales y de acuerdo con las conclusiones deducidas de los análisis teóricos desarrollados mediante el hidrograma unitario.

La intensidad (I) a utilizar en la expresión (4.5) se refiere a un valor medio a lo largo del intervalo pésimo de duración igual al tiempo de concentración calculado según (3.37). El empleo del método racional en el análisis de un determinado chubasco requeriría el análisis del hietograma de dicho chubasco, pero utilizado para el cálculo del caudal de diseño se refiere a una intensidad asociada a un determinado período de retorno. Para su cálculo es válido todo lo expuesto en el apartado 2.2 y en particular la expresión (2.4) que junto con el factor reductor por área (ARF) de la Figura (2.9) completan la formulación que permite obtener a partir de las isomáximas de lluvia diaria el valor de I a considerar.

4.4. Coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía (C) define la proporción de la intensidad de lluvia I que genera escorrentía superficial y obviamente está relacionado con el concepto de lluvia neta expuesto en apartados anteriores. El método racio-

nal aquí expuesto, obtiene la expresión de C basándose en la formulación del S.C.S. desarrollada en el apartado 3.2.4. y en particular en la expresión (3.13) función del parámetro P_0 o umbral de escorrentía allí definido.

El coeficiente instantáneo de escorrentía C, en un instante dado hasta el cual ha precipitado P y se ha provocado una escorrentía E, se podrá obtener derivando la expresión (3.13), con lo que se obtiene la siguiente formulación (Figura 4.1):

$$C = \frac{dE}{dP} = \frac{d(E/P_0)}{d(P/P_0)} = \frac{((P/P_0) - 1) * ((P/P_0) + 9)}{((P/P_0) + 4)^2} \quad (4.7)$$

El coeficiente instantáneo de escorrentía C va creciendo a lo largo de un aguacero y su valor medio en un intervalo será mayor que el correspondiente a su origen y menor que el del final. El intervalo objeto de estudio es aquel que proporciona mayor escorrentía y se admite que corresponde al de duración igual al tiempo de concentración y que contiene el máximo del hietograma. Si se conoce el valor de P en dicho instante, la expresión (4.7) permitirá obtener el coeficiente de escorrentía buscado.

Se ha comprobado en distintas estaciones pluviométricas españolas que en valores medios puede admitirse una ley lineal del tipo:

$$(P)\text{máx. intensidad} = b * P_d \quad (4.8)$$

en donde el parámetro b, que refleja la posición relativa del intervalo de máxima intensidad dentro del pluviograma diario, puede admitirse que toma un valor de 0.5, con lo que quedaría fijado el valor del coeficiente de escorrentía a

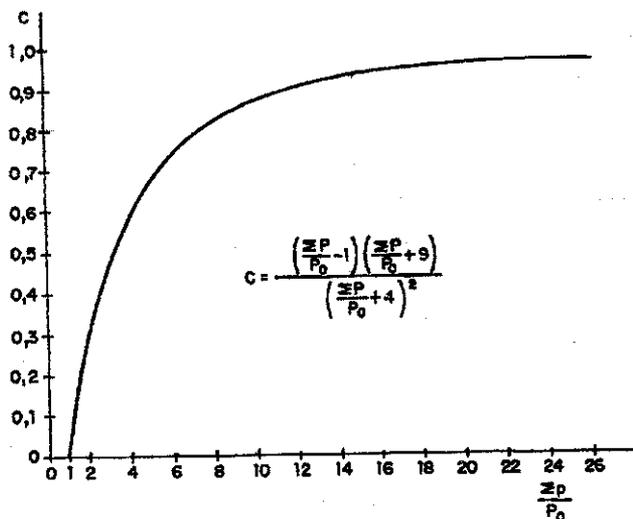


Fig. 4.1.-Coeficiente instantáneo de escorrentía basado en las leyes del S.C.S.

utilizar, en función exclusivamente de la lluvia diaria P_d .

Esta formulación debe ser corregida en los casos de aguaceros de pequeña magnitud puesto que en estos casos no se cumple sistemáticamente la hipótesis básica: el máximo caudal no está asociado al intervalo de máxima intensidad y duración T_c , ya que dicha precipitación quedará absorbida íntegramente por el terreno al ser menor que el umbral de escorrentía.

En estos casos, el intervalo generador del máximo caudal, y con él, el punto intermedio indicativo del coeficiente de escorrentía, se desplazan en el tiempo hacia la zona final del aguacero, en espera de condiciones más favorables de la humedad del suelo que las correspondientes al intervalo de máxima intensidad.

Este problema se aborda modificando la ley anterior, en el entorno de los pequeños valores, haciéndola despegar del eje $C = 0$ para $P_d = P_0$, para tender posteriormente a confundirse con la curva primitiva (Figura 4.2), proponiéndose finalmente la siguiente expresión definitiva, suficientemente ajustada:

$$C = \frac{((P_d/P_0 - 1) * ((P_d/P_0) + 23))}{((P_d/P_0) + 11)^2} \quad (4.9)$$

4.5. Ejemplo numérico

Para resumir lo anteriormente expuesto, en la Figura 4.3, se resume el sencillo proceso operativo de cálculo propuesto que puede haber quedado diluido en el anterior desarrollo.

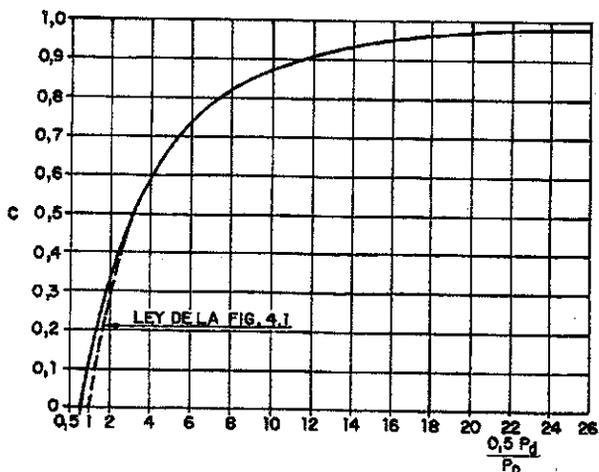


Fig. 4.2.-Ley propuesta del coeficiente de Escorrentía

DATOS

Características físicas de la cuenca Area (A) = 50 Km ² Longitud (L) = 9,0 Km ² Pendiente (J) = 0,02 m/m	Lluvia Pd = 100 mm l1/l _d = 11,0	Escorrentía Po = 35 mm
---	---	---------------------------

CALCULO

ORDEN	FORMULACION	EXPRESION	RESULTADO
1	$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76}$	(3.37)	3,35 h
2	$K = 1 + \frac{T_c^{1,25}}{T_c^{1,25} + 14}$	(4.6)	1,24
3	ARF	(figura 2.9)	0,89
4	$P = Pd * ARF$		89 mm
5	$I = \left(\frac{P}{24} \right) \left(\frac{l_1}{l_d} \right) \frac{28^{0,1} - T_c^{0,1}}{28^{0,1} - 1}$	(2.4)	18,7 mm
6	$C = \frac{((P_d/P_o - 1) * ((P_d/P_o) + 23))}{((P_d/P_o) + 11)^2}$	(4.9)	0,21
7	$C = \frac{CIA}{3,6} k$	(4.5)	68 m ³ /s