

## 8.1 Introducción

El caudal de una corriente, en general, está constituido de dos partes. Una de ellas, el flujo base, proviene del agua subterránea y la otra, la escorrentía directa, proviene de las últimas lluvias. No todas las corrientes reciben aporte de agua subterránea, ni todas las precipitaciones provocan escorrentía directa. Sólo las precipitaciones importantes, es decir, intensas y prolongadas, producen un aumento significativo en la escorrentía de las corrientes. La contribución de agua subterránea a las corrientes de agua no puede fluctuar rápidamente debido a la baja velocidad del flujo.

Las corrientes en cuenca con suelos permeables, y que reciben gran aporte de agua subterránea, muestran caudales altos sostenidos a lo largo del año, con una relación baja entre caudales de avenidas (crecidas) y caudales medios. Las corrientes en cuencas con suelos de baja permeabilidad, y que mas bien aportan agua a los acuíferos, presentan relaciones altas entre caudales pico y promedio, con caudales muy bajos o nulos entre crecientes. El hidrograma A de la figura 8.1 corresponde a las corrientes del primer tipo, y el hidrograma B a las del segundo tipo. Nuestros ríos que desembocan en el Pacífico tienen características del tipo B.

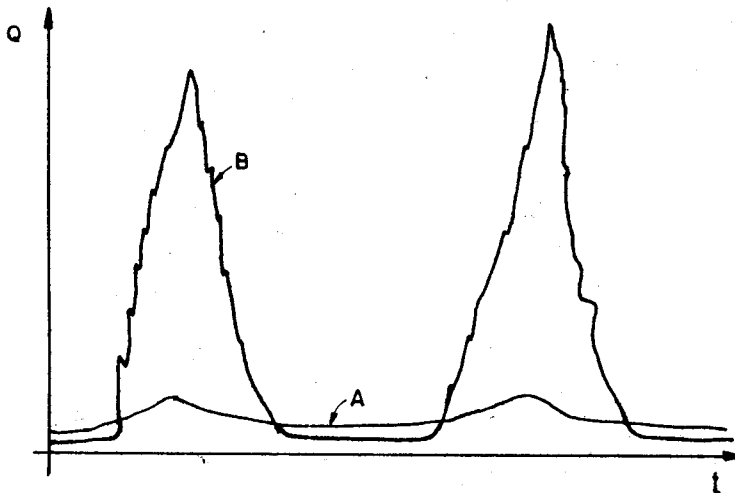


FIG. 8.1 CAUDALES MEDIOS Y CAUDALES PICOS

Los hidrogramas de crecidas vienen a ser los hidrogramas resultantes de lluvias importantes aisladas. Su estudio es bastante útil para el diseño de los aliviaderos de las presas de embalse, cuya misión es la de dejar salir del embalse las aguas provenientes de avenidas. También es útil el estudio de los hidrogramas de crecidas para otros proyectos, como defensas contra las inundaciones, predicción de avenidas, y otros.

## 8.2 El Hidrograma Típico

El hidrograma típico de una tormenta aislada (figura 8.2) consta de una rama ascendente, un segmento de cresta y una rama descendente o curva de recesión.

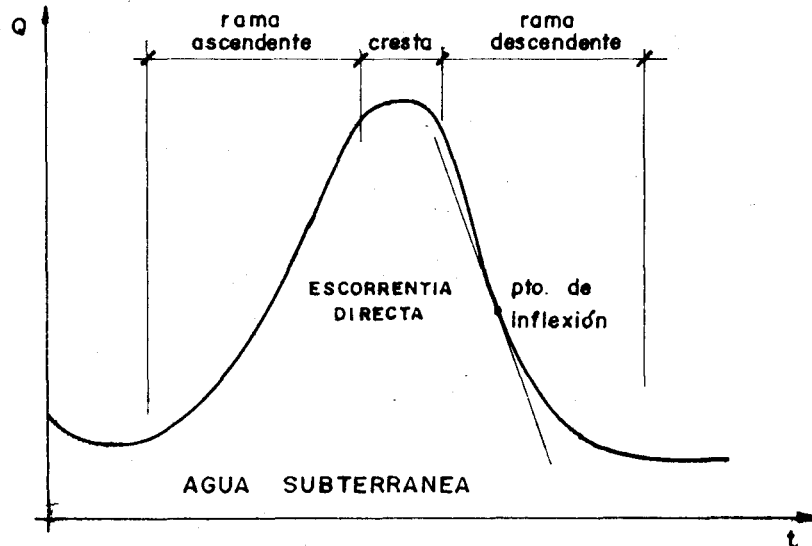


FIG. 8.2 EL HIDROGRAMA TIPICO

La forma de la rama ascendente está influenciada sobre todo por las características de la lluvia que causa el ascenso. La forma de la recesión en cambio es bastante independiente de ello y más bien depende de las características de la cuenca (apartado 7.1). Se asume por lo general que el punto de inflexión de la curva de recesión coincide con el tiempo al cabo del cual cesa la escorrentía superficial hacia los cursos; de ahí en adelante la curva representa el aporte de agua almacenada dentro de la cuenca. El último tramo de la curva de recesión representa casi completamente el flujo de agua subterránea.

### Separación en el hidrograma

En un hidrograma de crecida hay necesidad de separar lo que es escorrentía directa y lo que es flujo base. No existe una forma única de hacer la separación, y puesto que las definiciones de las dos componentes son un tanto arbitrarias los métodos de separación son también arbitrarios.

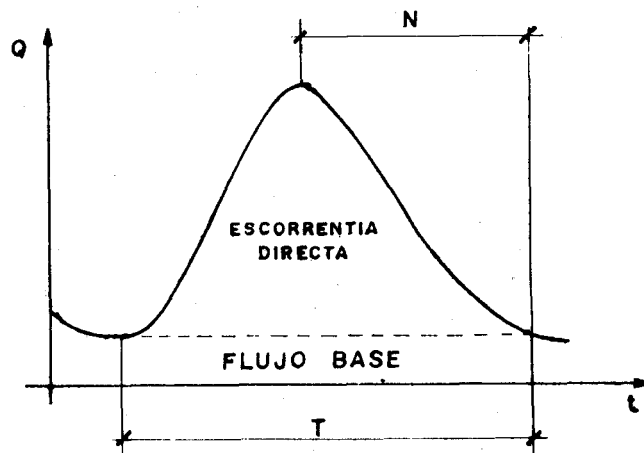


FIG. 8.3 SEPARACION EN EL HIDROGRAMA

Supongamos ya efectuada la separación (figura 8.3). El método empleado debe ser tal que el tiempo de escorrentía directa  $T$  llamado tiempo base sea siempre el mismo de tormenta a tormenta de la misma duración y en la misma cuenca. Hay que tener cuidado con esto porque sólo así se puede aplicar el concepto de hidrograma unitario que se estudia luego.

El primer intento realizado para efectuar la separación consiste en terminar la escorrentía directa un tiempo prefijado después del pico del hidrograma. Se ha formulado para este tiempo  $N$  en días:

$$N = a A^b$$

donde  $A$  es el área de la cuenca en  $\text{km}^2$  y  $a, b$  coeficientes empíricos. Hallados  $a, b$ , para una región, se ha sugerido aumentar  $N$  en un 50% para hoyas largas y angostas u hoyas con pendientes suaves, y disminuir  $N$  en un 10% para cuencas empinadas. Sin embargo, el valor de  $N$  quizá sea mejor determinarlo observando un cierto número de hidrogramas, teniendo presente que el tiempo base no debe ser excesivamente largo y que el incremento en aporte de agua subterránea no debe ser muy grande.

Un procedimiento para la separación del hidrograma consiste en prolongar la recesión anterior a la tormenta hasta un punto bajo el pico del hidrograma ( $AB$ , figura 8.4), y conectar este punto mediante una línea recta con uno sobre el hidrograma localizado  $N$  días después del pico (punto  $C$ ).

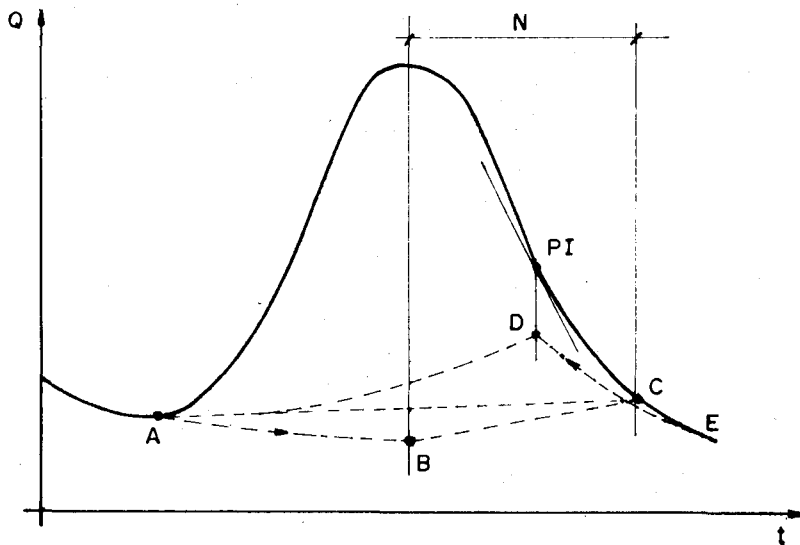


FIG. 8.4 METODOS DE SEPARACION

Otro procedimiento consiste en trazar simplemente la recta  $AC$ . La diferencia en el volumen del flujo base por estos dos métodos es tan pequeña que se justifica la simplificación siempre y cuando, naturalmente, se utilice consistentemente un solo método.

Un tercer método de separación se ilustra mediante la recta  $ADE$ . Se proyecta hacia atrás la línea de recesión hasta un punto bajo el punto de inflexión de la rama descendente; luego se traza un segmento arbitrario ascendente desde  $A$  (inicio de la rama ascendente) hasta conectarse con la recesión antes proyectada. Este método de separación es susceptible de un estudio analítico y es el indicado cuando el aporte de agua subterránea es relativamente grande y llega a la corriente con rapidez.

### 8.3 El Hidrograma Unitario

Es propósito del presente capítulo mostrar cómo obtener, para una cuenca, el hidrograma de crecida correspondiente a una tormenta dada. Esto se resuelve mediante la técnica del hidrograma unitario. Por esta razón se describirá primero en qué consiste el hidrograma unitario y cómo se obtienen los de una cuenca determinada.

#### 8.3.1 Definición

Puesto que las características físicas de la cuenca (forma, tamaño, pendiente, cubierta, etc) son constantes, se debe esperar una similitud considerable en la forma de los hidrogramas resultantes de tormentas parecidas. Esta es la esencia del hidrograma unitario tal como lo propuso Sherman en 1932.

El hidrograma unitario de las  $t_1$  horas de una cuenca se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de 1 cm de lluvia neta caída en  $t_1$  horas, generada uniformemente sobre el área de la cuenca a una tasa uniforme (figura 8.5).

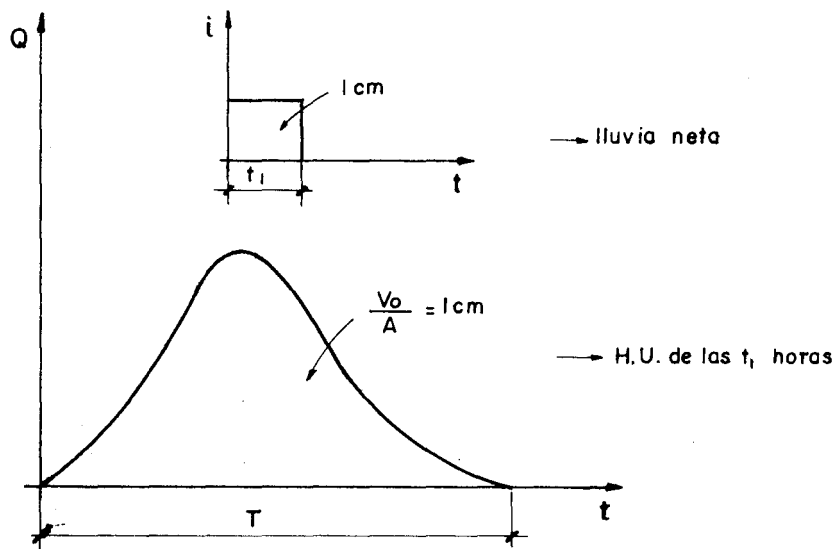


FIG. 8.5 EL HIDROGRAMA UNITARIO

La definición anterior y las siguientes hipótesis constituyen la teoría del hidrograma unitario.

- La lluvia neta es de intensidad uniforme en el período  $t_1$  horas.
- La lluvia neta está uniformemente distribuida en toda el área de la cuenca.
- Los hidrogramas generados por tormentas de la misma duración tienen el mismo tiempo base a pesar de ser diferentes las láminas de lluvia neta.
- Las ordenadas de escorrentía directa de hidrogramas de igual tiempo base son proporcionales a las láminas de escorrentía directa representadas por los hidrogramas. Se conoce como principio de proporcionalidad.
- Para una cuenca dada, el hidrograma de escorrentía directa

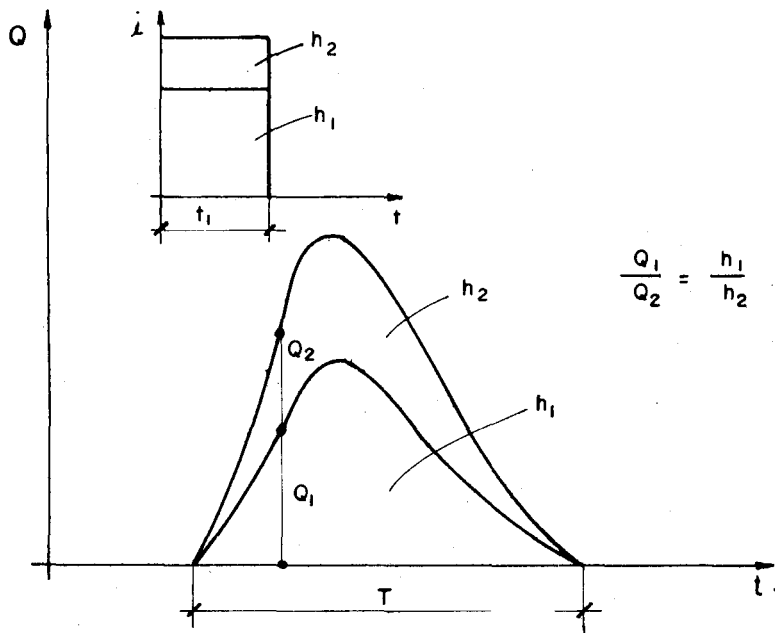


FIG. 8.6 PRINCIPIO DE PROPORCIONALIDAD

debido a una tormenta refleja todas las características combinadas de la cuenca. Quiere decir que a tormentas iguales corresponden hidrogramas también iguales. Se conoce como principio de invariancia.

Principio de superposición (figura 8.7)

Planteamiento: conocido el hidrograma de escorrentía directa (A) correspondiente a la lluvia neta de lámina  $h_1$  y duración  $t$ , encontrar el hidrograma de escorrentía directa correspondiente a la lluvia compuesta de dos períodos, de láminas  $h_2, h_3$  e igual duración  $t$  cada uno.

8.3.2 Obtención de los H.U.

Se parte de conocer el hidrograma resultante de una lluvia neta uniforme de duración conocida ( $t_1$  horas). Se trata de hallar el H.U. de las  $t_1$  horas para esa cuenca. El método consiste en (figura 8.8):

- 1º separar el flujo base de la escorrentía directa.
- 2º por planimetría obtener el volumen de escorrentía directa ( $V_0$ )
- 3º obtener la lámina de escorrentía directa ( $h$ ), dividiendo el volumen  $V_0$  entre el área de la cuenca:

$$\frac{V_0}{A} = h$$

Esta lámina de escorrentía directa es, por definición, igual a la lámina de lluvia neta.

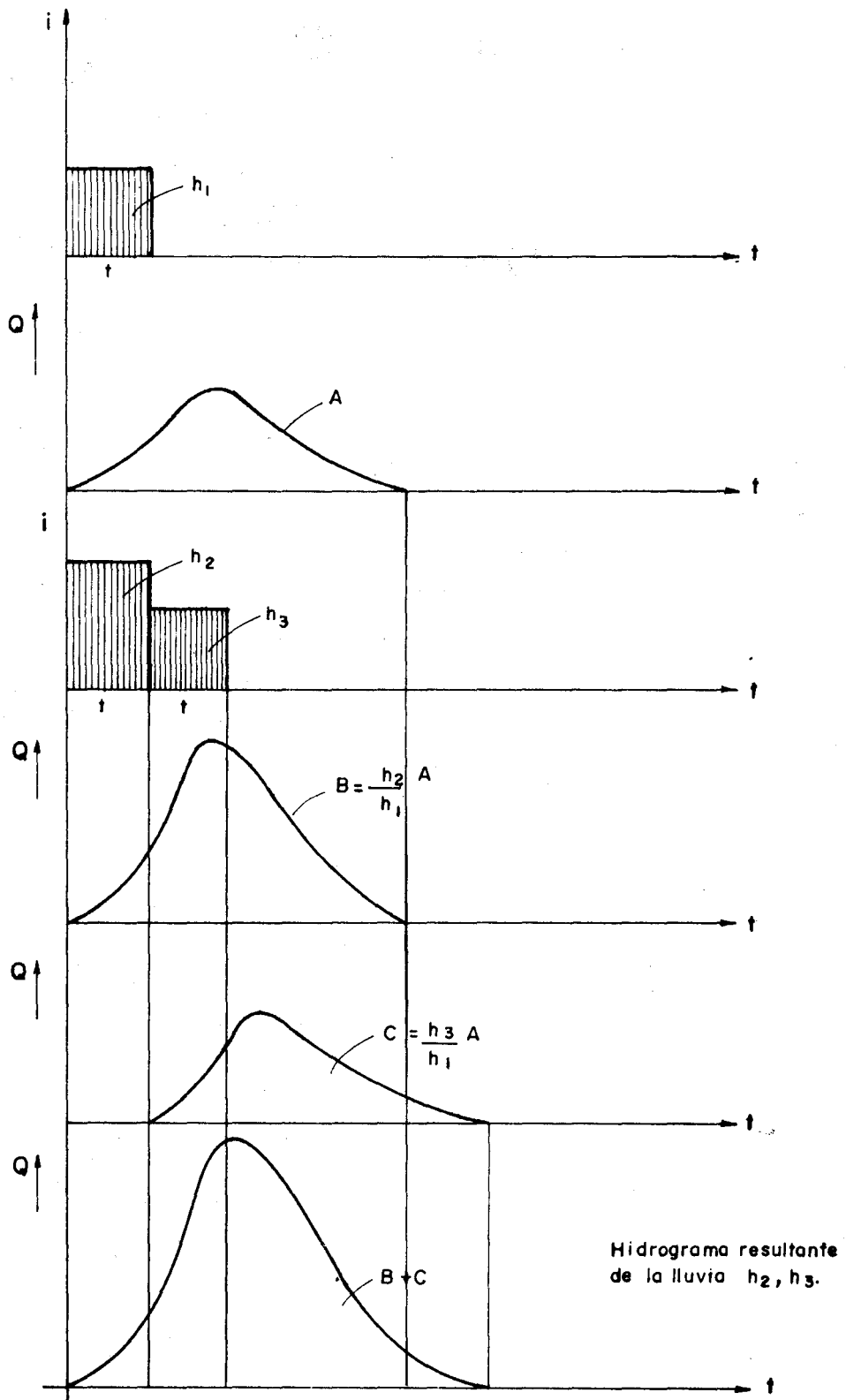


FIG. 8.7 PRINCIPIO DE SUPERPOSICION

4º dividir las ordenadas de escorrentía directa entre la lámina  $h$ . Los valores obtenidos son las ordenadas del H.U. de las  $t_1$  horas.

$$\frac{Q}{h} = u$$

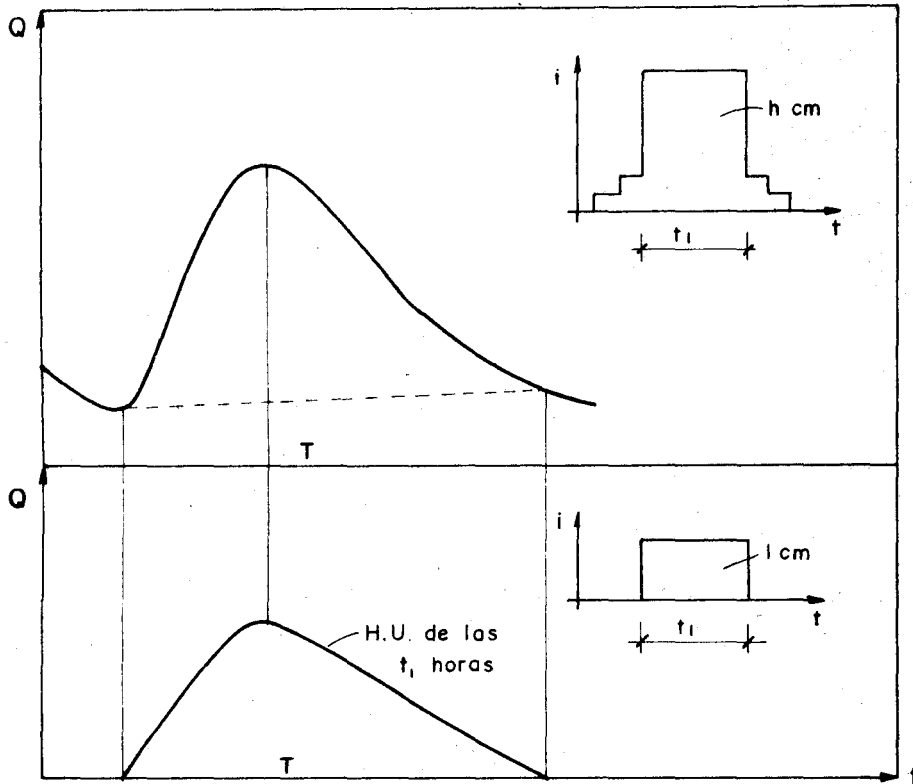


FIG. 8.8 OBTENCION DEL H.U.

Para un mejor resultado conviene obtener varios H.U. de la misma duración y promediarlos. Hay que tener presente que el promedio de dos H.U. no se logra promediando las ordenadas, sino que hay que seguir este procedimiento (figura 8.9):

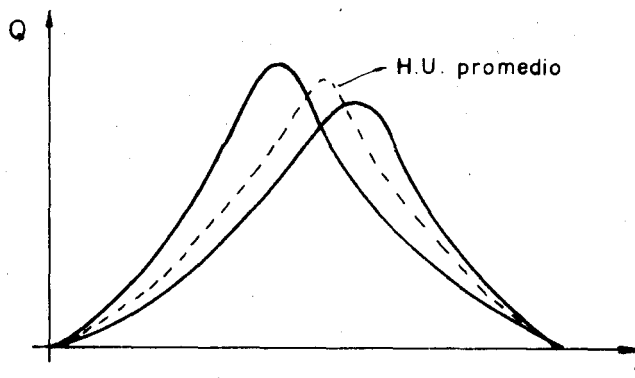


FIG. 8.9 PROMEDIO DE DOS H.U.

- 1º calcular el pico promedio y el tiempo al pico promedio,
- 2º dibujar el H.U. promedio siguiendo la forma de los otros dos y chequeando que tenga una lámina de 1 cm.

### 8.3.3 La Curva S

La curva S de una cuenca se dibuja a partir del H.U. de las  $t_1$  horas y sirve para obtener el H.U. de las  $t_2$  horas. Aquí radica su enorme importancia: permite derivar hidrogramas unitarios a partir de uno conocido.

Se llama curva S (figura 8.10) el hidrograma de escorrentía directa que es generado por una lluvia continua uniforme de duración infinita. La lluvia continua puede considerarse formada de una serie infinita de lluvias de período  $p$  tal que cada lluvia individual tenga una lámina de 1 cm. El efecto de la lluvia continua se halla sumando las ordenadas de una serie infinita de hidrogramas unitarios de  $t_1$  horas según el principio de superposición.

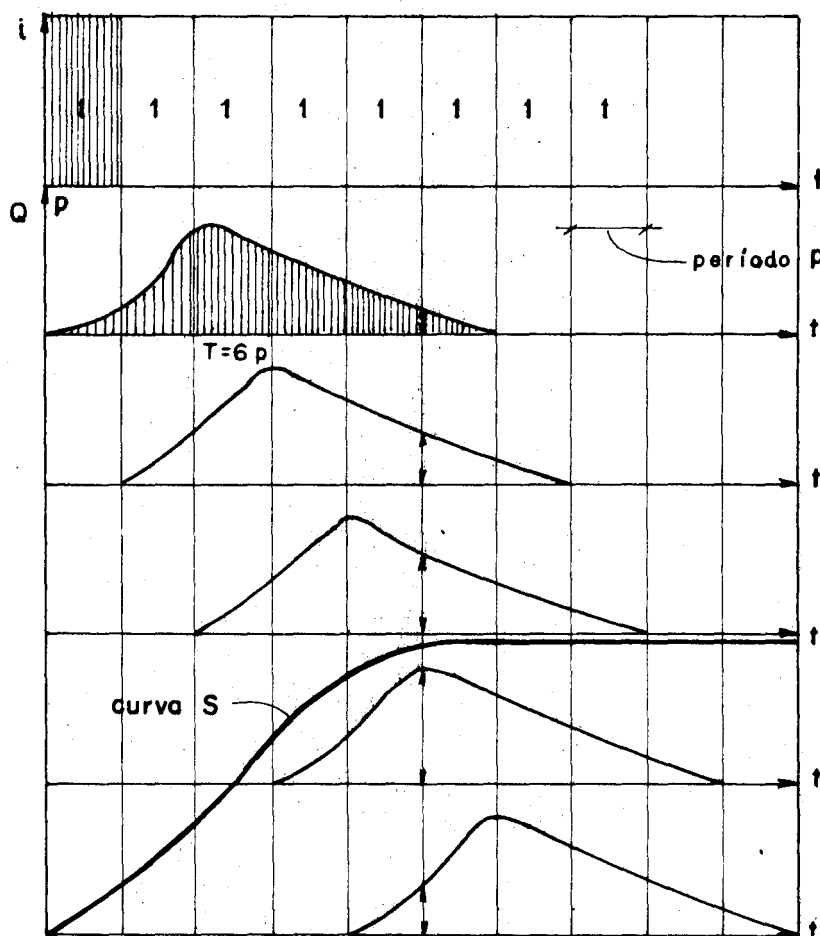


FIG. 8.10 LA CURVA S

En el esquema de la figura 8.10 el tiempo base del H.U. es igual a 6 períodos. La suma máxima de ordenadas se alcanza después de 5 períodos (uno menos que el tiempo base), cuando la ordenada de la curva S es igual a la suma de todas las ordenadas del H.U.

Dibujada la curva S a partir del H.U. de las  $t_1$  horas puede ser usado para obtener el H.U. de las  $t_2$  horas, según el siguiente procedimiento (figura 8.11).

- 1º dibujar la curva S a partir del H.U. de las  $t_1$  horas,
- 2º dibujar la misma curva S desplazada  $t_2$  horas a la derecha,
- 3º multiplicar la diferencia de ordenadas de las dos curvas S por el factor  $t_1/t_2$  para obtener las ordenadas del H.U. de las  $t_2$  horas.

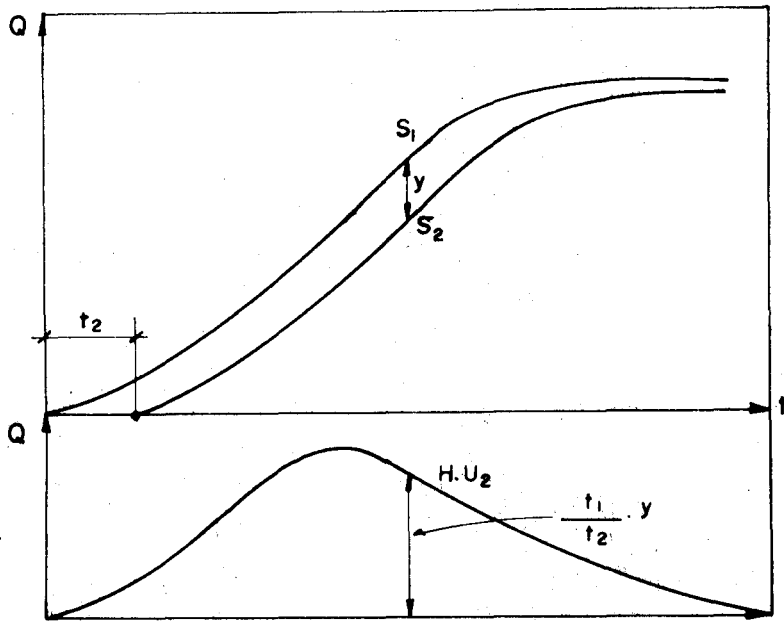


FIG. 8.11 APLICACION DE LA CURVA S

El procedimiento es válido para  $t_2$  mayor o menor que  $t_1$ . En cuanto al tiempo base resulta:  $T_{b2} = T_{b1} - t_1 + t_2$ . Acerca del procedimiento puede trabajarse gráficamente o mediante tabulación.

#### 8.3.4 Aplicación de los H.U.

Conocido el H.U. de una cuenca para una cierta duración, ese H.U. permite obtener el hidrograma de escorrentía directa correspondiente a una tormenta simple de igual duración y una lámina cualquiera de lluvia neta, o el correspondiente a una tormenta compuesta de varios períodos de igual duración y láminas cualesquiera de lluvia neta. Precisamente la figura 8.12 muestra esta última aplicación debiéndose observar que para hallar el hidrograma resultante se hace uso del método de superposición.

#### 8.3.5 Hidrogramas Unitarios Sintéticos

Los hidrogramas unitarios se pueden obtener por el método descrito en el apartado 8.3.2 sólo cuando se dispone de registros. Para las cuencas sin registros han sido sugeridos los hidrogramas unitarios sintéticos, que se construyen en base a fórmulas obtenidas empíricamente. Los esfuerzos han sido orientados a obtener fórmulas para el tiempo al pico, el caudal pico y el tiempo base. Estos datos y el hecho de que la lámina de escorrentía directa debe ser la unidad, permiten el trazado del H.U. La mayoría de los estudios se basan en lo que se llama el tiempo de

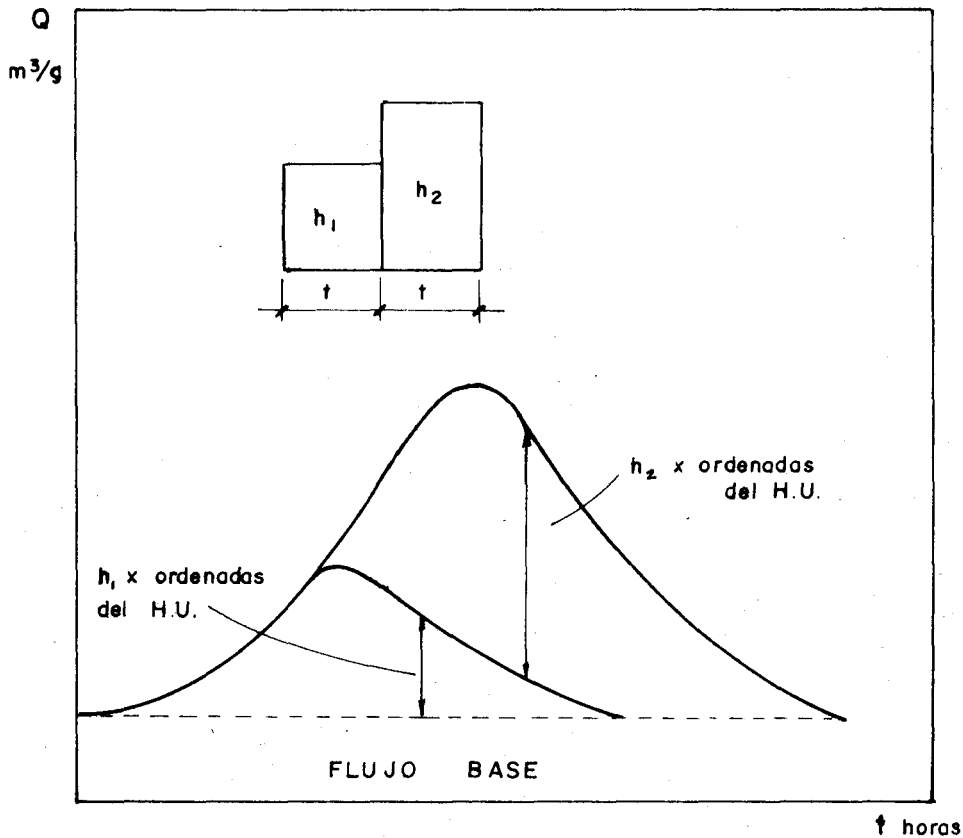


FIG. 8.12 APLICACION DE LOS H.U.

retardo de la cuenca, generalmente definido como el tiempo desde el centro de gravedad del histograma de lluvia neta hasta el pico del hidrograma.

A continuación se describe el procedimiento sugerido por Snyder, el primero de su género, desarrollado en los Estados Unidos.

$$T_L = C_1 \cdot (L \cdot L_c)^{0.3} \quad (8.1)$$

$T_L$  ... tiempo de retardo de la cuenca, en horas

$L$  ... longitud de la corriente principal desde el punto inicial de las aguas hasta el punto de desagüe de la cuenca, en km

$L_c$  ... distancia desde el punto de desagüe hasta el punto de la corriente principal más próximo al centro de gravedad de la cuenca, en km

$C_1$  ... coeficiente que varía entre 1.35 y 1.65, con los valores menores para las cuencas con pendientes más fuertes.

(El producto  $L \cdot L_c$  es una medida del tamaño y la forma de la cuenca).

Antes de establecer la fórmula para el caudal pico, es necesario

adoptar una duración tipo de lluvia neta (T). Snyder adoptó:

$$T = \frac{T_L}{5.5} \quad (8.2)$$

Para lluvias de esta duración:

$$Q_p = \frac{7,000 C_2 A}{T_L} \quad (8.3)$$

$Q_p$  ... caudal pico, en lt/seg, para una lámina de escorrentía directa de 1 pulg (25.4 mm).

A ... área de la cuenca, en  $km^2$

$C_2$  ... coeficiente que varía entre 0.56 y 0.69

Para el tiempo base rige la fórmula:

$$T_b = 3 + 3 \frac{T_L}{24} \quad (8.4)$$

$T_b$  ... tiempo base, en días

$T_L$  ... tiempo de retardo, en horas

Las ecuaciones 8.1, 8.3, 8.4 definen los tres elementos necesarios para construir el H.U. para una duración tipo dada por 8.2. Para cualquier otra duración  $T_D$  el tiempo de retardo viene dado por:

$$T_{LD} = T_L + \frac{T_D - T}{4} \quad (8.5)$$

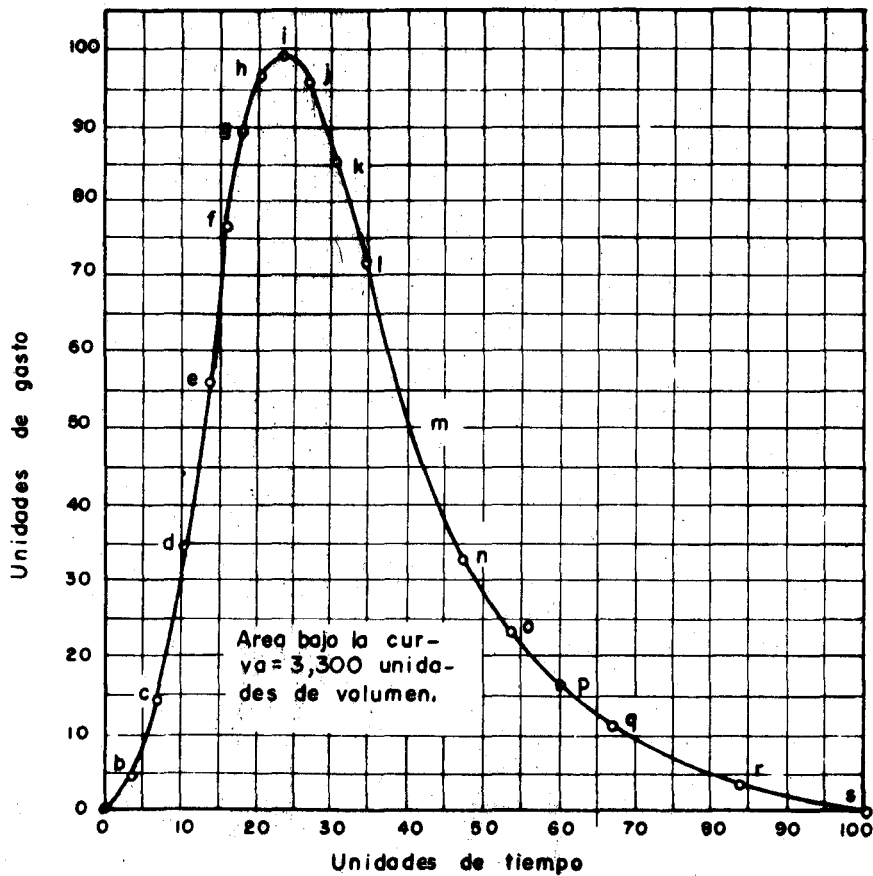
empleándose este retardo modificado en las ecuaciones 8.3 y 8.4.

Las fórmulas de Snyder fueron obtenidas a partir del estudio de cuencas de la región de los montes Apalaches. Al ser probadas en otras regiones se observó que los coeficientes  $C_1$ ,  $C_2$  varían de modo apreciable. Por ello, la mejor manera de emplear estas ecuaciones es deducir valores de  $C_1$ ,  $C_2$ , a partir de los H.U. de cuencas medidas de características similares a la cuenca problema. Con lo que el procedimiento se convierte en un medio de trasposición de las características de los H.U. de una cuenca a otra.

#### 8.4 Hidrogramas Adimensionales

De los estudiado hasta aquí se desprende que para una misma cuenca los hidrogramas de crecidas presentan la misma forma general, y que esta forma general refleja las características hidrológicas de la cuenca.

Se desprende que para cuencas hidrológicamente semejantes la forma general de los hidrogramas es más o menos la misma. Así es como se conciben los hidrogramas adimensionales. Estos hidrogramas son por eso válidos para cuencas de una misma región. Sin embargo, el hidrograma adimensional de la figura 8.13, obtenido como un promedio en los Estados Unidos, puede ser utilizado en cuencas sin mediciones. En este hidro-



a	t <sup>m</sup>	q <sup>m</sup>
a	0	0
b	3	5
c	7	15
d	10	35
e	13	56
f	16	77
g	18	90
h	20	97
i	23	100
j	27	96
k	30	85
l	34	72
m	40	50
n	47	33
o	53	24
p	60	16
q	67	11
r	84	4
s	100	0

\* t y q en %

FIG. 8.13 HIDROGRAMA ADIMENSIONAL

Ejemplo 8.1

Elaborar el hidrograma aproximado de una cuenca sin aforar, correspondiente a una crecida cuyo caudal pico es 17.64 m<sup>3</sup>/seg y su respectivo volumen 677,000 m<sup>3</sup>.

Relaciones generales:

$$u = \frac{V}{3,300} \quad \text{m}^3/\text{unidad} \quad (8.6)$$

$$q = \frac{Q}{100} \quad \text{m}^3/\text{seg}/\text{unidad} \quad (8.7)$$

$$t = \frac{u}{60 q} \quad \text{min}/\text{unidad} \quad (8.8)$$

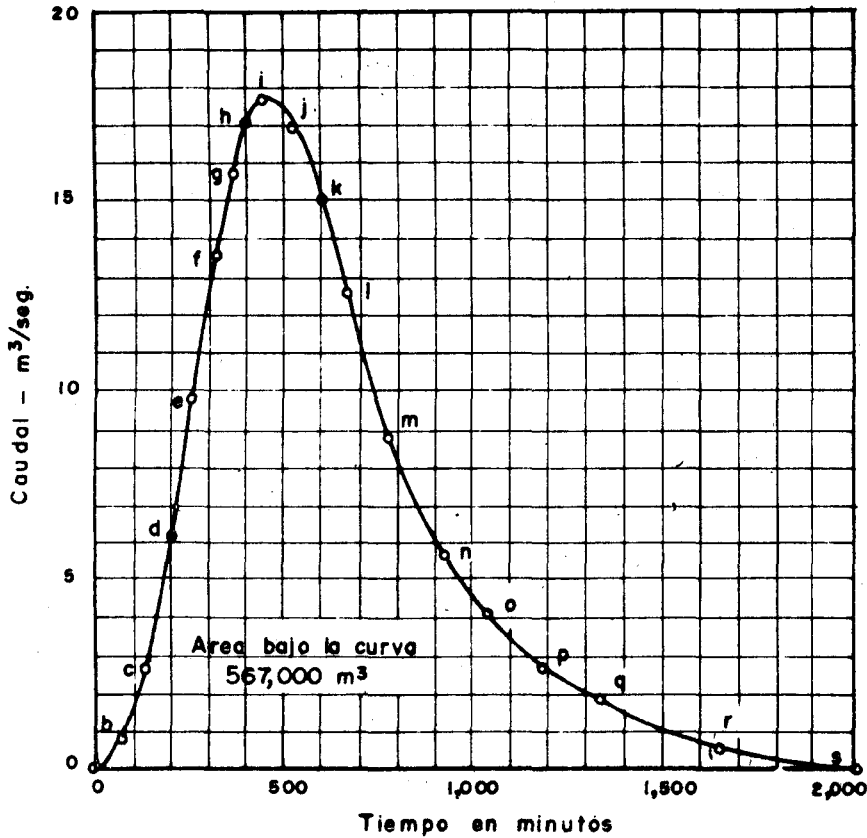
- u ... volumen de escorrentía correspondiente a una unidad de volumen del hidrograma básico.
- V ... volumen de la escorrentía, en m<sup>3</sup>.
- q ... caudal de escorrentía correspondiente a una unidad de caudal del hidrograma básico.
- Q ... caudal máximo de la escorrentía, en m<sup>3</sup>/seg.
- t ... tiempo en minutos correspondiente a una unidad de tiempo del hidrograma básico.

Para el caso que se estudia:

$$u = \frac{677,000}{3,300} = 205 \text{ m}^3/\text{unidad}$$

$$q = \frac{17.64}{100} = 0.1764 \text{ m}^3/\text{seg}/\text{unidad}$$

$$t = \frac{205}{60 \times 0.1764} = 19.6 \text{ min}/\text{unidad}$$



o	t*	q**
a	0	0
b	59	0.9
c	137	2.6
d	195	6.2
e	255	9.9
f	315	13.6
g	382	15.9
h	392	17.1
i	450	17.6
j	530	18.9
k	588	15.0
l	667	12.7
m	783	8.8
n	920	5.8
o	1,040	4.2
p	1,180	2.8
q	1,320	1.9
r	1,650	0.7

\* t en minutos  
q en m³/seg.

FIG. 8.14 HIDROGRAMA DEL EJEMPLO 8.1

### 8.5 Hidrogramas Triangulares

Es posible representar los hidrogramas de crecidas como triángulos, con la consiguiente simplificación del trabajo. A continuación se describe el procedimiento adoptado por el U.S. Conservation Service.

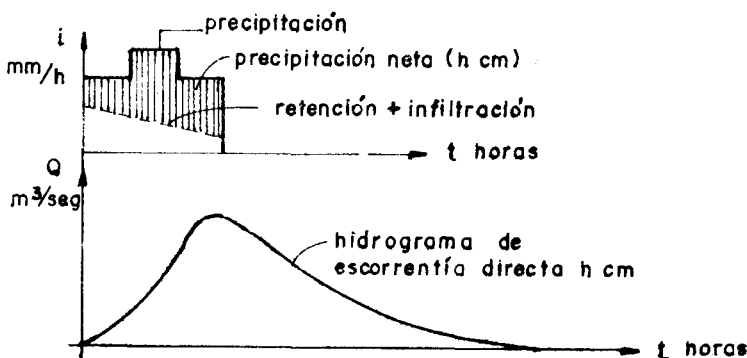


FIG. 8.15  
HIDROGRAMA TIPICO

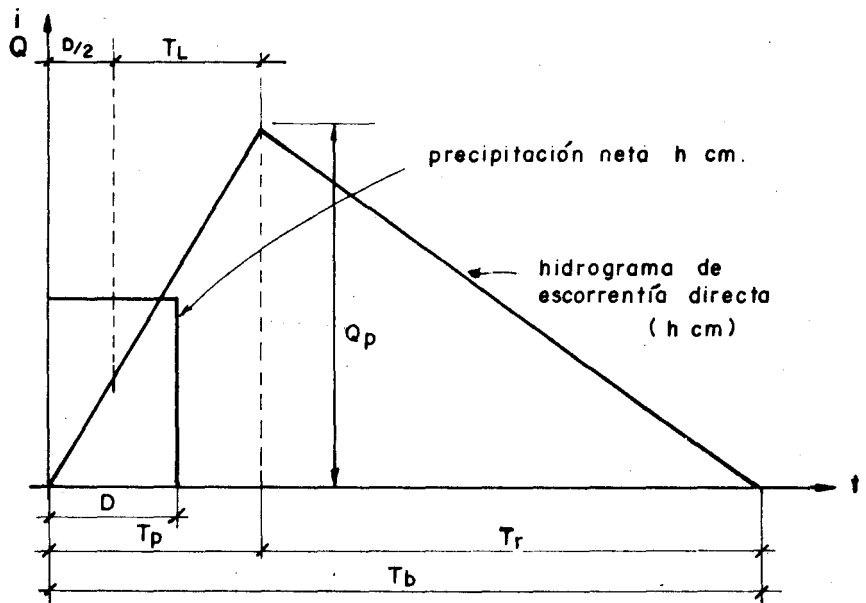


FIG. 8.16  
HIDROGRAMA  
TRIANGULAR

### Deducción de la fórmula para el caudal pico

En el hidrograma triangular:

$h$  ... lluvia neta, en cm

$V_0$  ... volumen de escorrentía directa, en  $m^3$

$Q_p$  ... caudal pico, en  $m^3/seg$

$T_p$  ... tiempo al pico, en horas =  $\frac{D}{2} + L$

$T_r$  ... tiempo después del pico, en horas

$T_b$  ... tiempo base del hidrograma

$D$  ... período de lluvia neta, en horas

$T_L$  ... tiempo de retardo, en horas

$T_c$  ... tiempo de concentración, en horas

$A$  ... área de la cuenca, en  $km^2$ .

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{V_0}{10^6 A} \cdot 10^2 = \frac{V_0}{10^4 A} \\
 &= \frac{1}{10^4 A} \left( \frac{3,600 T_p \cdot Q_p}{2} + \frac{3,600 T_r \cdot Q_p}{2} \right) \\
 &= \frac{1,800}{10^4 A} (T_p Q_p + T_r Q_p)
 \end{aligned}$$

$$Q_p = \frac{10^4 A h}{1,800 (T_p + T_r)} = \frac{5.556 A h}{T_p + T_r}$$

Se puede escribir  $T_r = \alpha T_p$ , expresión en la cual  $\alpha$  es una constante a determinar en cada cuenca.

$$Q_p = \frac{5.556 A h}{(1 + \alpha) T_p}$$

Un valor medio de  $\alpha$ , a usar en cuencas no aforadas, es 1.67, de modo que reemplazando:

$$Q_p = \frac{2.08 A h}{T_p} \quad (8.9)$$

Para el tiempo de retardo se puede usar la relación empírica:

$$T_L = 0.6 T_c \quad (8.10)$$

de modo que:

$$T_p = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.6 T_c \quad (8.11)$$

### Ejemplo 8.2 (obtención del hidrograma triangular)

$$A = 8 \text{ millas}^2 = 8 \times 2.59 \text{ km}^2 = 20.72 \text{ km}^2$$

$$T_c = 3 \text{ horas}$$

$$D = 2 \text{ horas}$$

$$h = 1.0 \text{ pulg} = 2.54 \text{ cm}$$

Para determinar el hidrograma triangular basta conocer  $T_p$ ,  $Q_p$ ,  $T_b$ .

$$T_p = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.6 T_c = \frac{2}{2} + 0.6 (3) = 1 + 1.8 = 2.8 \text{ horas}$$

$$Q_p = \frac{2.08 A h}{T_p} = \frac{2.08 \times 20.72 \times 2.54}{2.8} = 39.1 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$T_b = T_p + T_r = T_p + \alpha T_p = (1 + \alpha) T_p = 2.67 T_p = 7.48 \text{ horas}$$

USAR 7.5 horas

El error que se comete al trabajar con un hidrograma triangular está del lado de la seguridad, porque en el triángulo se distribuye una cantidad determinada de escurrimiento en un intervalo de tiempo más corto que en el hidrograma curvilíneo.

### Ejemplo 8.3 (aplicación del hidrograma triangular)

Datos:  $A = 100 \text{ millas}^2$

$$T_c = 10 \text{ horas}$$

Aguacero de  $D = 6$  horas, con incrementos sucesivos cada 2 horas de 0.6, 1.4 y 0.8 pulg de lluvia neta.

Calcular el hidrograma unitario de las 2 horas y luego construir el hidrograma compuesto.

$$\text{Para el H.U., } T_p = \frac{D}{2} + T_L = \frac{D}{2} + 0.6 T_c = \frac{2}{2} + 0.6 (10) = 7 \text{ horas}$$

$$Q_p = \frac{484 A h}{T_p} \quad (8.9a)$$

$Q_p$  ... caudal pico, en pie<sup>3</sup>/seg

$A$  ... área en millas<sup>2</sup>

$h$  ... lluvia neta en pulg

$T_p$  ... tiempo al pico, en horas

$$Q_p = \frac{484 \times 100 \times 1}{7} = 6,914 \text{ pie}^3/\text{seg}$$

$$T_b = T_p + T_r = T_p + \alpha T_p = (1 + \alpha) T_p = 2.67 T_p = 18.7 \text{ horas}$$

Elaboración del cuadro de construcción del hidrograma compuesto:

Duración de lluvia neta en horas	Lámina de lluvia neta en pulg	Caudal pico en pie <sup>3</sup> /seg	Hidrogramas		
			Hora del principio	Hora del pico	Hora del final
0					
2	0.6	4,148	0	7	18.7
4	1.4	9,680	2	9	20.7
6	0.8	5,530	4	11	22.7

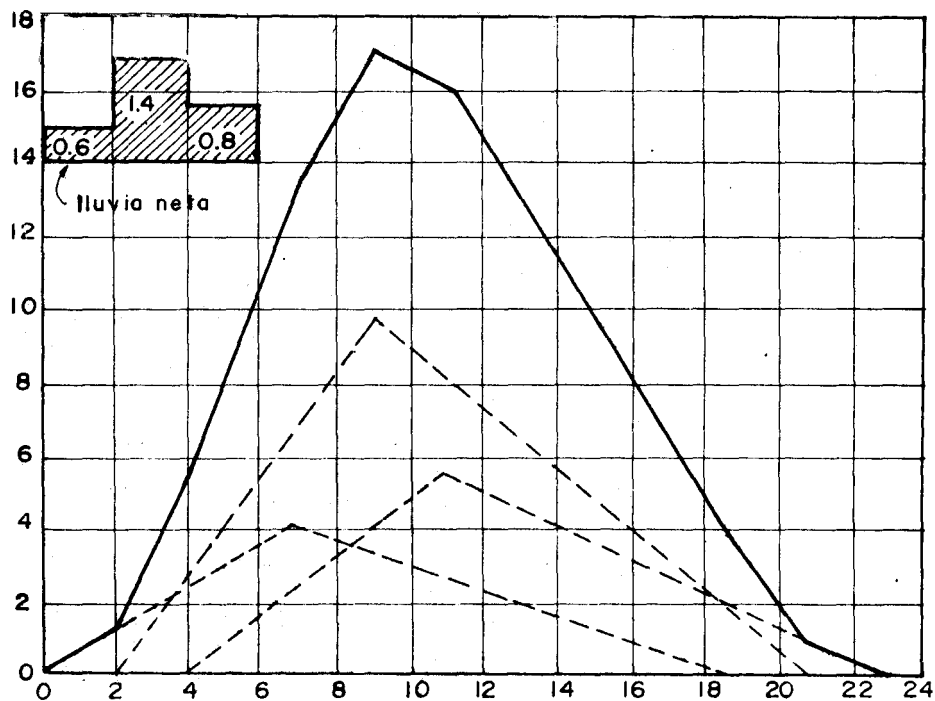


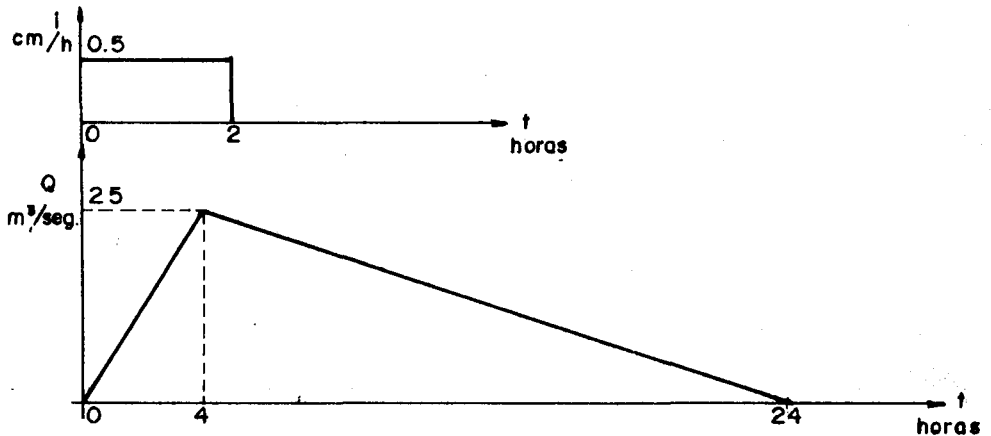
FIG. 8.17 HIDROGRAMA DEL EJEMPLO 8.3

## 8.6 Problemas

### Problema 8.1

Una tormenta consta de tres períodos de 2 horas cada uno e intensidades 3.0, 3.5 y 1.5 cm/h, respectivamente. El índice  $\phi$  es 1.0 cm/h. El área aproximada de la cuenca 110 km<sup>2</sup>. El hidrograma unitario de las dos horas de la cuenca se muestra abajo. El flujo base es bastante pequeño y puede ser despreciado.

- Dibujar el hidrograma resultante
- Verificar que la lámina de escorrentía directa es igual a la lámina de lluvia neta.

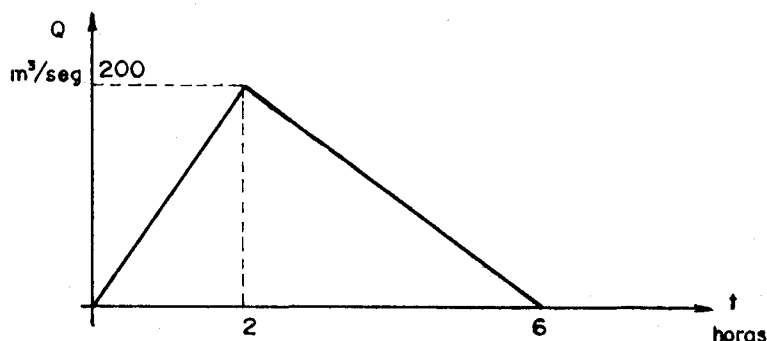


### Problema 8.2

Una lluvia constante de 4 horas de duración e intensidad 50 mm/h produce un caudal pico de 280 m<sup>3</sup>/seg. La tasa de pérdida de la cuenca es 12 mm/h y el flujo base es 20 m<sup>3</sup>/seg. Según la teoría del hidrograma unitario, ¿cuál sería el caudal pico de una lluvia de 4 horas, de 38 mm/h, si la tasa de pérdida es 15 mm/h y el flujo base 3 m<sup>3</sup>/seg?

### Problema 8.3

Una lluvia uniforme con una intensidad de 50 mm/h y una duración de 1 hora genera a la salida de cierta cuenca el hidrograma que se muestra abajo. Calcular el hidrograma causado por una lluvia uniforme de 20 mm/h y duración 2 horas. El índice  $\phi$  es de 10 mm/h.



#### Problema 8.4

El hidrograma unitario para una lluvia de 2 horas, de intensidad uniforme y lámina neta de 10 mm tiene las siguientes ordenadas:

Tiempo (horas)	0	1	2	3	4	5	6
Q (m <sup>3</sup> /seg)	0	77	155	116	78	38	0

Obtener el hidrograma unitario para una lluvia de 3 horas, de intensidad uniforme y la misma lámina de lluvia neta.