

01289
V.3
C1

A P U N T E S D E
H I D R O G R A M A U N I T A R I O

Curso Prof. B. Espíldora

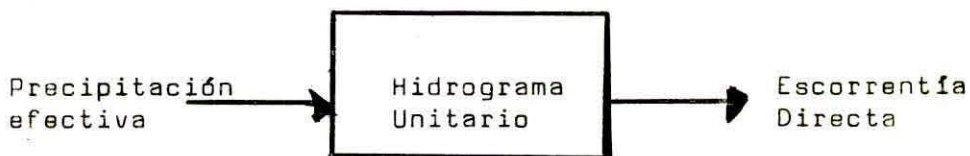


EL HIDROGRAMA UNITARIO

A) INTRODUCCION.-

En 1932, L.K. Sherman introdujo la teoría o el método del hidrograma unitario. El hidrograma unitario de una cuenca se define como "el hidrograma de la escorrentía directa que resulta de una precipitación efectiva de cierta cantidad (por ejemplo 1 mm) que se produce uniformemente sobre el área de la cuenca, con una intensidad constante durante un período de tiempo o duración especificada".

De esta definición se ve claramente que el método o teoría del hidrograma unitario se refiere exclusivamente a la relación que existe entre precipitación efectiva y escorrentía directa. En este sentido y como se verá más adelante, el hidrograma unitario puede considerarse como un operador que transforma una precipitación efectiva de cierta magnitud y duración (entrada o insumo al sistema o cuenca) en escorrentía directa (salida o producto del sistema o cuenca). Por estos motivos el hidrograma unitario (H.U.) para lluvias de cierta duración y cantidad es un hidrograma típico de la cuenca. Esquemáticamente el proceso del H.U. se puede esquematizar de la siguiente manera:



Debido a este hecho, la teoría matemática del hidrograma unitario es general para un sistema lineal con cualquier tipo de entrada y salida.

Antes de establecer las hipótesis básicas en que se basa la teoría del hidrograma unitario y de indicar los procedimientos para obtenerlo, es necesario hacer algunas consideraciones sobre la escorrentía directa y la precipitación efectiva ya que como se explicará más adelante, para obtener un hidrograma unitario de una cuenca es necesario relacionar en base a información previa, las precipitaciones efectivas y las correspondientes escorrentías directas generadas.

Los métodos de obtención de hidrogramas de escorrentía directa, y por lo tanto la del volumen de agua asociada a este componente, ya se indicaron en la sección correspondiente a separación y análisis de hidrogramas. Por lo tanto, en los métodos de obtención de hidrogramas unitarios que se explicarán más adelante, se supondrá que este tipo de problemas ya ha sido previamente resuelto.

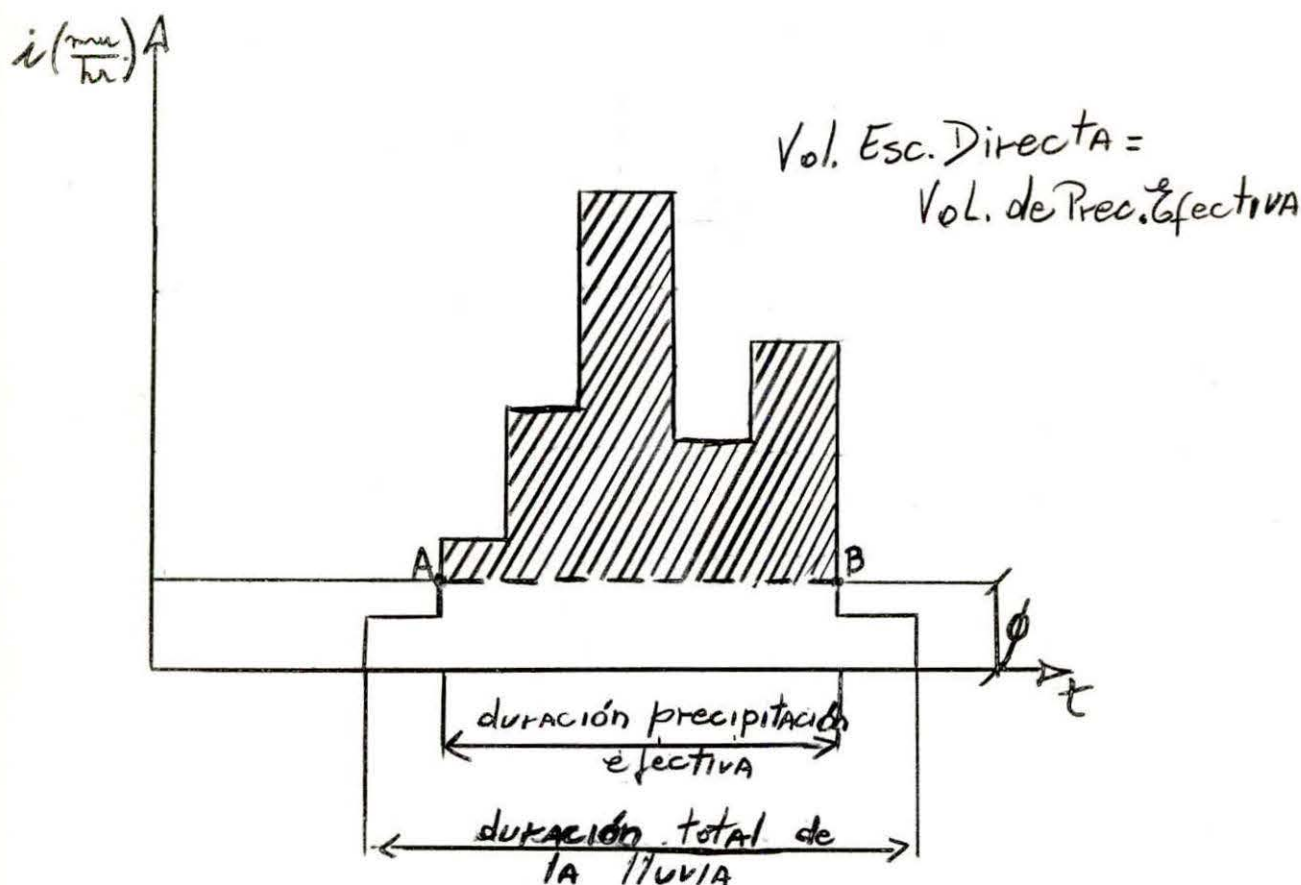
Según ya se ha indicado más atrás, se define como precipitación efectiva a aquella parte de la precipitación que sólo contribuye a la producción de escorrentía directa. El resto de la precipitación se interceptará, o contribuirá a llenar las depresiones del terreno, a saturar los suelos y producirá la escorrentía o flujo base. Por lo tanto, el volumen total de agua asociado a la precipitación efectiva debe ser igual al volumen total de agua de escorrentía directa, que a su vez corresponde a la integral de hidrograma de escorrentía directa. Sin embargo, la distribución en el tiempo de la precipitación efectiva y en especial su duración son difíciles de obtener con precisión. Este problema se debe a la dificultad ya mencionada en el capítulo sobre Infiltración, de poder aplicar procedimientos analíticos y rigurosos en relación a las curvas de capacidad de infiltración y de conocer la distribución en el tiempo de las pérdidas por interceptación y las variaciones de la cantidad de agua almacenada en depresiones superficiales. Por estos motivos se recurre a índices de infiltración que permitan conocer en forma práctica la distribución en el

tiempo de la precipitación efectiva y su duración total. A continuación se indican algunos procedimientos para obtener estos índices:

Por ejemplo:

Método del índice ϕ :

El índice ϕ se define como la intensidad de lluvia promedio por sobre la cual el volumen de lluvia es igual al volumen de escorrentía directa observada. Esta definición se indica esquemáticamente en la siguiente figura.



En base a esta definición, se puede asumir por lo tanto que el área achurada en la figura, por sobre la recta AB, representa la cantidad de lluvia afectiva y que el tramo AB corresponde a su duración.

El índice ϕ es igual a la recarga de la cuenca dividida por la duración de la lluvia, siempre que la intensidad de ésta sobrepase el valor del índice ϕ . El índice ϕ combina por lo tanto los efectos de intercepción, de almacenamiento en depresiones y la infiltración.

Método del índice W y del índice W mínimo:

El índice W se define como la tasa de infiltración promedio durante el tiempo en que la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración, es decir:

$$W = \frac{F}{t} = \frac{1}{t} (P - Q - S)$$

en que F es la infiltración total, t el tiempo, P la precipitación, Q la escorrentía directa debida a la tormenta y S el almacenamiento superficial o retención.

El índice ω es igual por lo tanto al índice ϕ menos la tasa de retención.

Si los suelos están muy saturados, la tasa de retención es mínima y los índices ω y ϕ son prácticamente iguales. En estas condiciones el índice ω se define como el índice ω mínimo. Este concepto se usa principalmente en estudios relativos a posibilidades de crecidas máximas.

B) HIPOTESIS BASICAS DEL H. U.-

Con estas consideraciones generales se puede entrar de lleno al estudio de los hidrogramas unitarios.

El método del hidrograma unitario se basa en las siguientes hipótesis:

- 1) La lluvia efectiva está uniformemente distribuída en el espacio.
- 2) La lluvia efectiva está uniformemente distribuída en el tiempo, dentro de su duración especificada.
- 3) El tiempo de base del correspondiente hidrograma de escorrentía directa es prácticamente constante para lluvias efectivas de la misma duración.
- 4) Las ordenadas homólogas de los hidrogramas de escorrentía directa de un mismo tiempo base, son directamente proporcionales al volumen total de escorrentía representado por cada hidrograma.
- 5) Para una determinada cuenca, el hidrograma de una crecida correspondiente a una lluvia determinada, refleja todo el conjunto de características físicas de la cuenca (forma, tamaño, pendiente, suelos, vegetación, etc.) y estas se suponen invariantes en el tiempo.

Bajo condiciones reales de la cuenca y del régimen de precipitaciones, las hipótesis anteriores no pueden satisfacerse plenamente. Además, en rigor, es erróneo sostener que un hidrograma unitario de cierta duración^{*} es general y único para la cuenca independientemente de la magnitud de las intensidades de lluvias consideradas. Estas limitaciones de las hipótesis supuestas y una mayor explicación de ellas se analizan a continuación.

En relación a la primera hipótesis, las variaciones espaciales de la lluvia efectiva pueden provocar cambios apreciables en la forma del hidrograma resultante, y por lo tanto, los H.U. para lluvias de la misma duración, distribución en el tiempo y magnitud, pero de distintas distribuciones espaciales, serían diferentes. Ello es posible que ocurra en cuenas muy grandes en que, con toda seguridad la lluvia efectiva no va a estar uniformemente distribuída en el espacio. Por estos motivos, la experiencia ha indicado que los H.U. son especialmente aplicables, desde este punto de vista práctico, a cuencas con una superficie no mayor de 3000 a 5000 Km². Sin embargo, en cuencas con régimen de precipitaciones, primordialmente orográfico, aunque la distribución espacial no sea uniforme para una misma lluvia, la configuración general se mantiene sensiblemente constante de una precipitación a otra y, por lo tanto, estos efectos no tendrían tanta importancia.

En relación a la segunda hipótesis, es conveniente desde un punto de vista práctico, desarrollar hidrogramas unitarios en base a una selección de tormentas de corta duración, ya que éstas serán en general más intensas y con mayores posibilidades de uniformidad en el tiempo. Si la intensidad de la lluvia efectiva varía considerablemente, se producen distorsiones y cambios en la forma del hidrograma resultante. Este efecto será de mayor importancia según sea el tamaño de la cuenca y el tiempo durante el cual se mantenga una determinada variación de la intensidad de la lluvia. En efecto, existe cierto efecto de atenuación de las variaciones temporales de la lluvia que será más marcada en cuencas de mayor superficie. Si la duración de la intensidad de la lluvia subsiste un tiempo mayor, esta atenuación de la cuenca no será suficiente para "filtrar" el efecto de estas variaciones en el hidrograma correspondiente. Por estos motivos, se recomienda que la duración básica de las lluvias efectivas que se consideren para obtener un H.U. sea de alrededor de un cuarto del tiempo de desfase de la cuenca y en general no mayor que 24 horas.

La tercera hipótesis manifiesta que los hidrogramas de las lluvias efectivas de la misma duración tienen el mismo tiempo base. (Es necesario recalcar, sin embargo, que el tiempo base de un hidrograma de escorrentía directa es prácticamente imposible de determinar exactamente, ya que ello dependerá del método de separación de componentes que se haya empleado) Para una lluvia efectiva con una duración t_R , que cae uniformemente distribuida en el tiempo y sobre una cuenca de tiempo de desfase t_C , el tiempo base del hidrograma correspondiente será:

$$T = t_R + t_C$$

Comunmente conviene elegir lluvias unitarias de duración 1/3 a 1/5 del tiempo de concentración.

Se deduce por lo tanto que el tiempo de base de un hidrograma unitario variará en el mismo sentido y magnitud que la duración de la lluvia efectiva y que a una mayor duración de ésta deberá corresponder un menor gasto máximo para mantener el mismo volumen de escorrentía, que para el H.U. se toma igual a 1 mm. Teóricamente sería necesario obtener un H.U. para cada duración posible de lluvias efectivas. Sin embargo, desde un punto de vista práctico, el efecto de las variaciones de duración no son tan grandes y se puede aceptar una tolerancia de $\pm 25\%$ en la duración establecida para obtener un H.U., es decir, si se ha desarrollado un H.U. de una duración de 4 horas, por ejemplo, este mismo hidrograma podrá ser usado para lluvias efectivas con duraciones comprendidas entre 3 y 5 horas.

La cuarta hipótesis se refiere al principio de linealidad o superposición. La teoría del hidrograma unitario supone que las cuencas se comportan como sistemas lineales, es decir, las ordenadas homólogas o correspondiente de los hidrogramas de escorrentía directa son directamente proporcionales a los correspondientes volúmenes de precipitación efectiva. Por ejemplo, si se ha obtenido un H.U. cuyo volumen de escorrentía directa es 1 mm (repartido en toda la cuenca), el hidrograma de escorrentía directa que corresponde a una lluvia efectiva de 5 mm y de la misma duración ($\pm 25\%$),

- * La duración se refiere a la duración de las lluvias efectivas para las cuales se ha deducido el H.U., y no la duración del tiempo base del hidrograma.

se obtendrá multiplicando las ordenadas del H.U. por 5. Otra manera de considerar esta hipótesis es que las ordenadas de los hidrogramas de escorrentía directa son respectivamente proporcionales y por lo tanto pueden superponerse numéricamente en proporción a los volúmenes escurridos. Un H.U. corresponde por lo tanto a un operador lineal, ya que opera sobre una lluvia efectiva de cierta duración y distribución espacial y temporal para transformarla linealmente en el hidrograma de escorrentía directa que le corresponde. Es fácil darse cuenta que esta hipótesis relativa a la transformación lineal no tiene porqué cumplirse en estricto rigor ya que la complejidad y heterogeneidad de las cuencas y su variable comportamiento frente a distintas características del régimen de lluvias, producen en realidad una transformación no lineal de la lluvia efectiva en escorrentía directa. Actualmente, existen evidencias de que esta hipótesis representa uno de los principales defectos del método del H.U., por lo que se están desarrollando investigaciones para considerar los complejos efectos de la no linealidad de los sistemas hidrológicos. Sin embargo, desde el punto de vista práctico que interesa al ingeniero hidráulico y mientras los métodos no lineales permanezcan en la etapa de investigación básica, la teoría del hidrograma es adecuada dentro de la precisión actual que tienen las técnicas y datos hidrológicos.

La quinta hipótesis del hidrograma unitario se refiere a que el hidrograma de escorrentía directa refleja el efecto combinado de todas las características físicas de una cuenca para una determinada configuración espacial y temporal de la lluvia efectiva. Ello supone a su vez, que el sistema hidrológico es un sistema invariante, es decir, las características físicas no varían en el tiempo. Es un hecho sabido y fácilmente comprobable que las características físicas de la cuenca varían debido a efectos estacionales, alteraciones producidas por el hombre (urbanización, desarrollo y rehabilitación de tierras agrícolas, etc.) y a efectos producidos por sismos, erosión, etc. Sin embargo, aunque la irreversibilidad de esta hipótesis se reconozca, actualmente es imposible considerar todos estos efectos de invariancia y en este sentido la importancia de estos procesos hacen ver la necesidad de plantear serias y complejas investigaciones para su solución.

Desde un punto de vista teórico, las suposiciones de linealidad e invariancia son las únicas hipótesis necesarias para una teoría general del hidrograma unitario. Las otras hipótesis no son totalmente esenciales y sólo se establecen para los efectos prácticos de la obtención del H.U. de una cuenca.

C) PROCEDIMIENTOS PARA OBTENER UN HIDROGRAMA UNITARIO.-

Como se indicó anteriormente, el hidrograma unitario se define como: "el hidrograma de la escorrentía directa que resulta de una precipitación efectiva de 1 mm., que se produce uniformemente sobre la cuenca con una intensidad constante durante un período de tiempo o duración especificada".

Debe quedar claro que un determinado H.U. debe referirse a una lluvia efectiva de distribución temporal y espacial uniforme y de cierta duración especificada. Tal lluvia se dice que es una lluvia unitaria. En este sentido se habla, por ejemplo de un H.U. de 6 horas, es decir, corresponde al hidrograma que produce una lluvia efectiva de 1 mm y que tiene una duración de 6 horas (aproximadamente).

La definición del H.U., las hipótesis en que se basa y la consideración anterior, indican el procedimiento que debe seguirse para obtener el H.U. de una cuenca.

El hidrograma unitario de una cuenca se obtiene a partir de los pluviogramas y correspondientes hidrogramas previamente observados. Al seleccionar estas lluvias y crecidas para este análisis, es necesario tener en cuenta que las hipótesis en que se basa el H.U. se cumplen lo más rigurosamente posible.

En efecto, después de un estudio de las características de la cuenca (tiempo de concentración, red de drenaje, fisiografía, etc.) conviene seleccionar hidrogramas simples y aislados que corresponden a lluvias intensas, de corta duración y con distribución espacial y temporal lo más uniforme posible. Si ello no es factible, será necesario derivar el H.U. a partir de crecidas y lluvias complejas, como se indicará más adelante.

Las lluvias y correspondientes hidrogramas seleccionados, se analizan de la siguiente manera:

1.- Análisis de datos de lluvia:

El análisis de los datos de cada una de las lluvias seleccionadas, se efectúa según los siguientes puntos:

- a) A partir de los datos proporcionados por los pluviógrafos y pluviómetros de la cuenca se determina un pluviograma (o curva de lluvia acumulada vs. tiempo) medio ponderado para la cuenca en estudio y durante la lluvia considerada.
- b) Del pluviograma medio se obtiene el hietograma de la lluvia (intensidad vs. tiempo).
- c) En base a curvas o índices de infiltración se determina el volumen y duración de la precipitación efectiva para la lluvia considerada. (Esta etapa debe efectuarse usando los datos del hidrograma según se indica a continuación).

2.- Análisis de los hidrogramas:

Los hidrogramas correspondientes a las lluvias elegidas se analizan de acuerdo a las siguientes etapas:

- a) Se determinan los tiempos de subida y los tiempos de desfase de los hidrogramas.
- b) Por cualquiera de los procedimientos indicados se efectúa una separación de los dos componentes básicos del hidrograma: escorrentía directa y flujo base.
- c) Se determina el volumen de escorrentía directa durante la crecida y se lo expresa en lámina de agua, dividiendo por la superficie de la cuenca. Este valor permite obtener el volumen de lluvia efectiva y mediante el uso del índice ϕ permite obtener la duración de ésta.

Como ya se indicó, en la obtención del hidrograma unitario se deben distinguir dos situaciones: hidrogramas unitarios obtenidos a partir de lluvias de intensidad sensiblemente constantes e hidrogramas unitarios obtenidos a partir de lluvias de intensidad variable. Cada uno de estos casos se analiza a continuación.

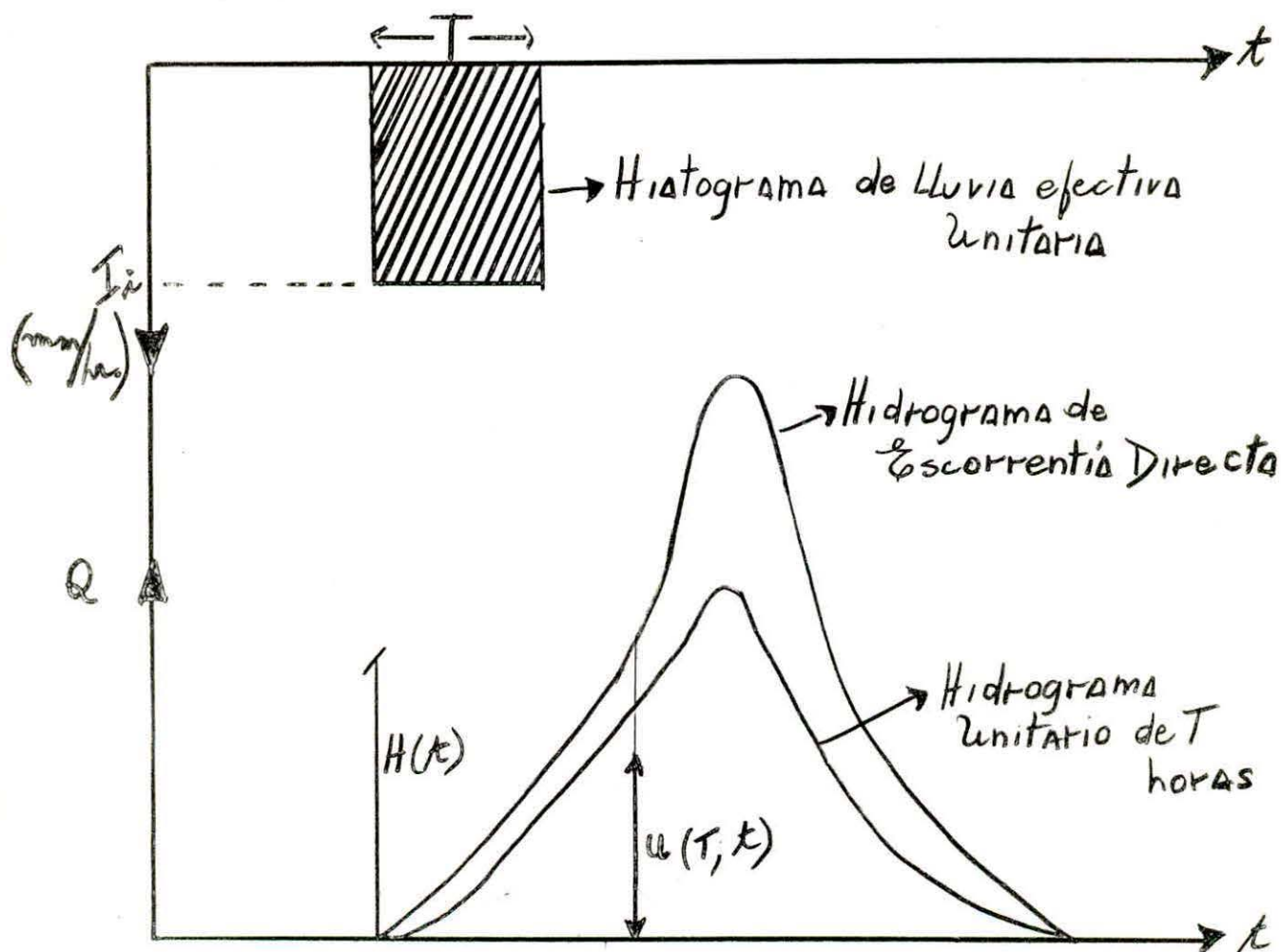
3.- Obtención de H.U. para lluvias de intensidad sensiblemente constante:

Supongamos que se dispone de varios hidrogramas de escorrentía directa que corresponden a lluvias efectivas de duración similar ($\pm 25\%$), T , con intensidades sensiblemente constantes, I_1 , y de aproximadamente la misma distribución espacial. Una

lluvia de este tipo corresponde por lo tanto a una lluvia unitaria.

Según las hipótesis en que se basa el hidrograma unitario, los correspondientes hidrogramas (de escorrentía directa) deben tener el mismo tiempo base y sus ordenadas correspondientes, deben ser proporcionales a los respectivos volúmenes escurridos.

Por lo tanto, para obtener el respectivo hidrograma unitario de una de estas lluvias unitarias, bastará dividir las ordenadas del hidrograma real correspondiente, por el volumen de escorrentía.

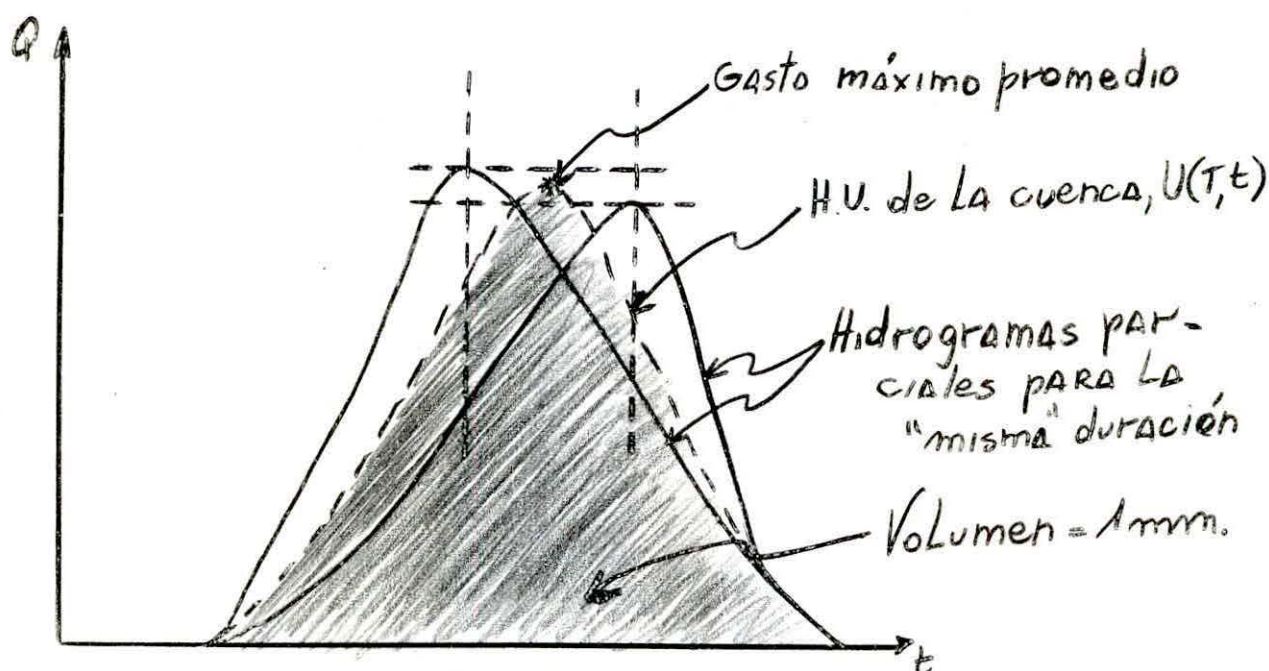


En la figura se indica el volumen de una lluvia efectiva de duración T y de intensidad constante I , el correspondiente hidrograma de escorrentía directa y el hidrograma unitario. Según lo explicado anteriormente, cada una de las ordenadas del H.U. se obtiene dividiendo las ordenadas del hidrograma real, por la cantidad total de escorrentía directa (o de lluvia efectiva). Es decir:

$$U(T, t) = \frac{H(t)}{IT}$$

en que $U(T,t)$ es la ordenada del H.U. de duración T , correspondiente al tiempo " t ".

El mismo procedimiento se sigue para todas las lluvias efectivas que tengan una duración igual o similar*. Es de esperar que los H.U. obtenidos de esta manera para una "misma" lluvia unitaria, no correspondan exactamente si se les superponen, y por lo tanto es necesario promediar los diversos H.U. obtenidos parcialmente para diversas tormentas de la "misma" duración. Para ello es conveniente promediar los diferentes gastos máximos y los correspondientes tiempos de subida de los H.U. parciales. En base a este par de valores se dibuja un hidrograma que se ajuste a la forma y distribución de los H.U. parciales, que encierre un área que corresponda a una lámina de agua de 1 mm. El hidrograma así obtenido se asume que corresponde al H.U. medio de la cuenca para cierta duración de lluvia efectiva.



Aplicación:

Una vez obtenido el hidrograma unitario medio para la cuenca, se puede estimar el hidrograma o "la marcha de la crecida" que corresponde a cualquier cantidad de lluvia efectiva que tenga la "misma" duración que corresponde al H.U. y una distribución espacial uniforme o al menos similar a la de las lluvias unitarias usadas anteriormente para su determinación. En efecto, como este H.U. corresponde a una lluvia efectiva de 1 mm (es decir, corresponde a un volumen de escorrentía directa igual a 1 mm), bastará multiplicar las ordenadas del H.U. por la nueva cantidad de lluvia efectiva, para tener el hidrograma estimado de la correspondiente crecida que se producirá. Es decir, el hidrograma $q_d(t)$ de la crecida producida por una lluvia efectiva de P (mm) será igual a:

$$q_d(t) = P_{eff} U(T,t)$$

$P =$ tiene duración T

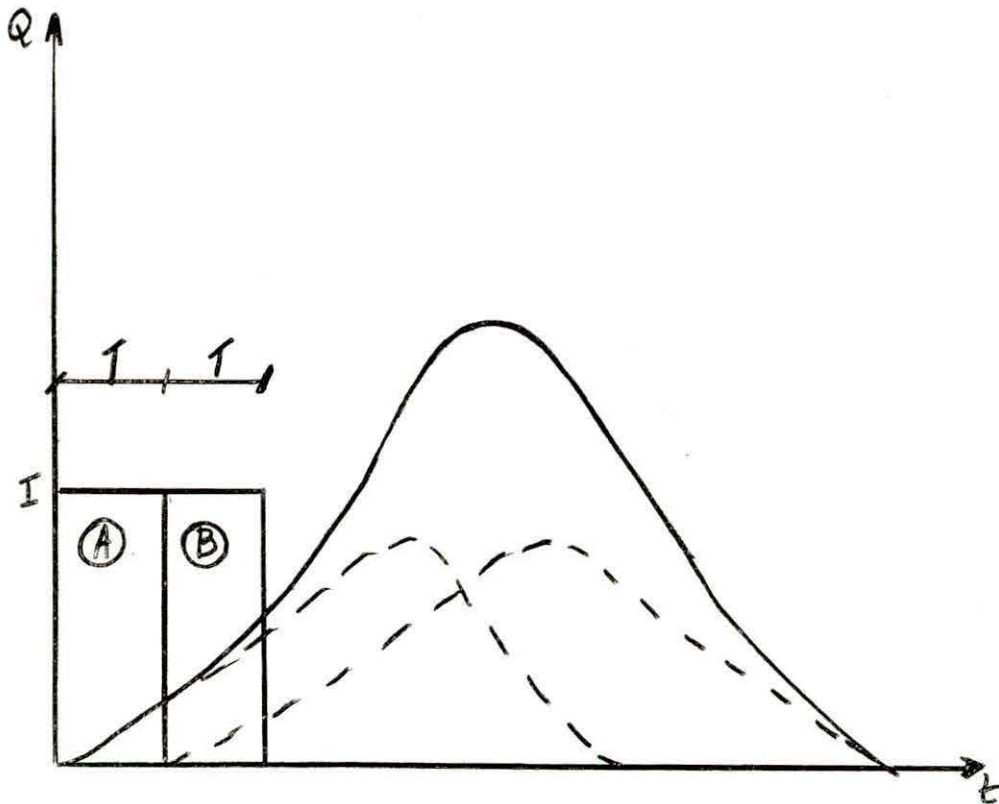
Como el hidrograma así obtenido corresponde sólo al de la escorrentía directa, deberá hacerse una estimación independiente del flujo base para tener el hidrograma total.

* Comúnmente se acepta que todas las lluvias de duraciones comprendidas entre $\pm 25\%$ constituyen lluvias de la "misma" duración.

4.- Obtención de hidrogramas unitarios para otras duraciones:

Las consideraciones mencionadas más arriba parecerían indicar que es necesario repetir los procedimientos indicados para una diversidad de duraciones posibles de las lluvias efectivas. Sin embargo, una vez obtenido el H.U. para cierta duración (lluvia unitaria), los H.U. correspondientes a otras duraciones pueden derivarse mucho más fácilmente por medio de los procedimientos que se explican a continuación y que se basan en el ya establecido principio de linealidad o de superposición.

Supongamos que se conoce el hidrograma de una crecida que corresponde a una lluvia de intensidad I y de duración T y se pide determinar el hidrograma de una lluvia de la misma intensidad pero de duración 2T. Suponiendo válido el principio de superposición, este hidrograma será igual a la suma de dos hidrogramas que correspondan a una lluvia de duración T, pero desfasados en T como se indica en la figura.

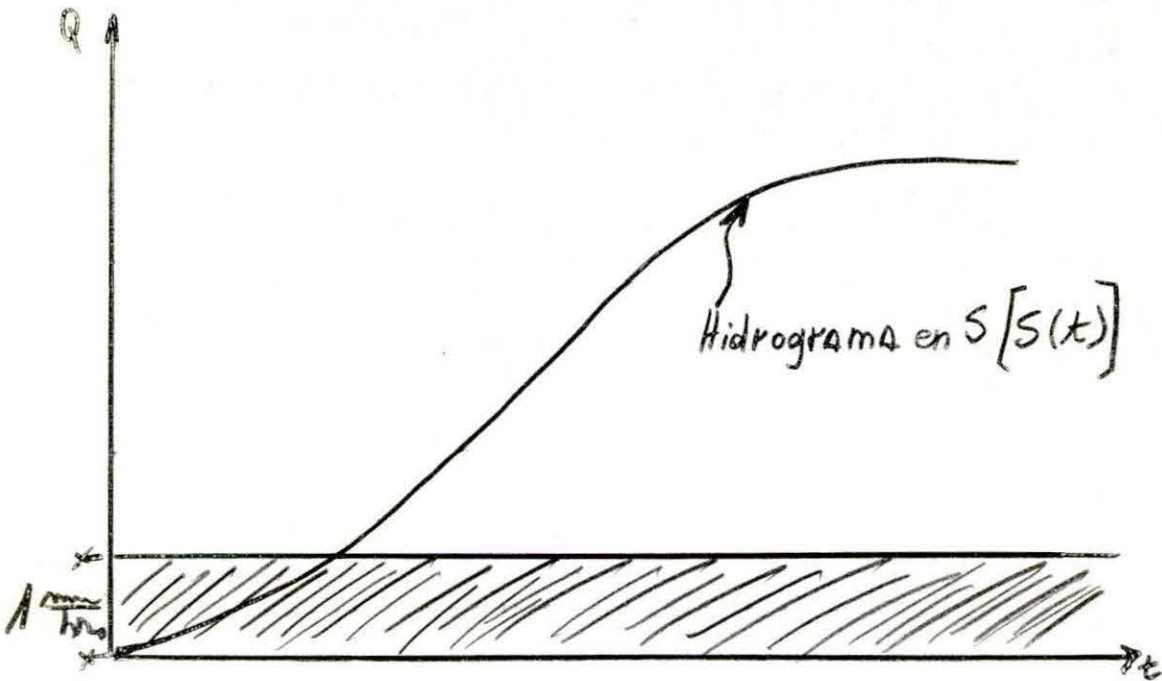


En el caso de un hidrograma unitario, el área bajo él corresponde por definición a una lámina de agua igual a 1 mm. Por lo tanto, para determinar el H.U. de duración 2T a partir de otro H.U. de duración T, si se suman 2 H.U. de duración T, desfasados en T, se obtendrá un hidrograma que corresponde a la duración 2T, pero que representa una lluvia efectiva de 2 mm. Por lo tanto, si las ordenadas de este hidrograma se dividen por 2, se obtendrá finalmente el H.U. de duración 2T. En general:

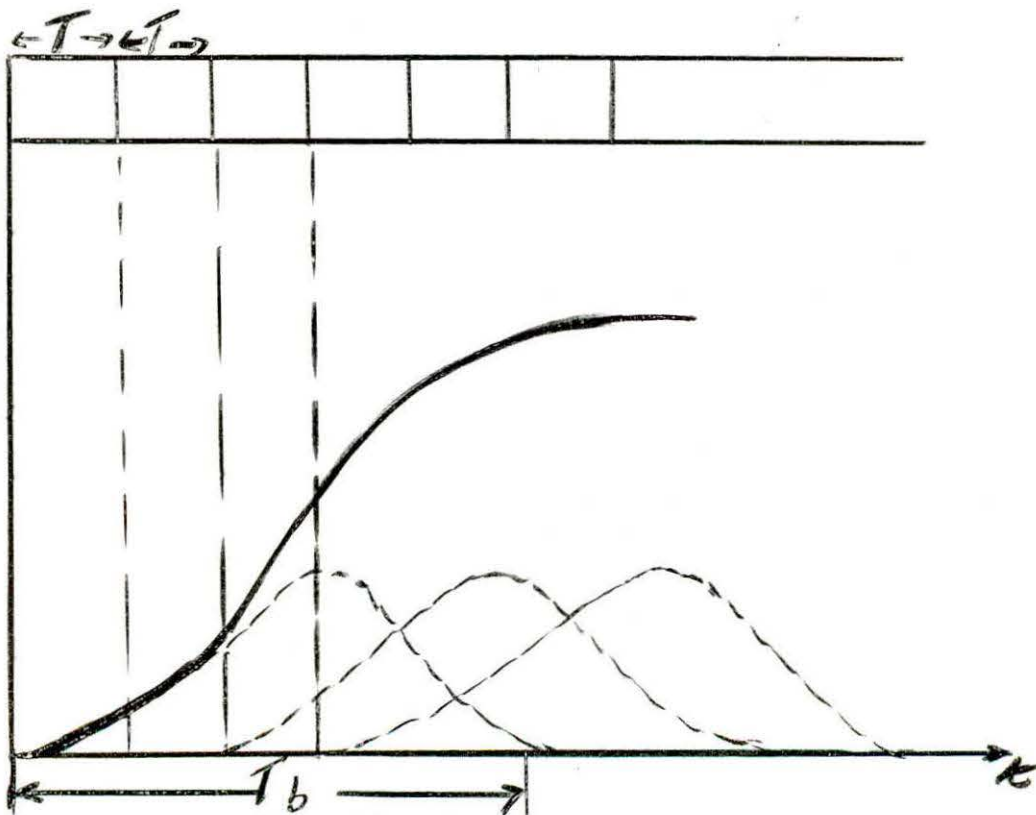
$$U(nT, t) = \frac{1}{n} \left[u(T, t) + u(T, t-T) + u(T, t-2T) + \dots + u(T, t-(n-1)T) \right]$$

Este método evidentemente falla si se pretende obtener un H.U. para otra duración que no sea un múltiplo exacto de la duración original. Para estos casos se recurre al método de la "curva S" o del hidrograma en S.

Se define el "hidrograma en S" como el hidrograma de escorrentía directa que produce una lluvia efectiva de intensidad constante unitaria (1 mm/hora) durante un tiempo indefinido (ver figura).



El hidrograma en S se puede obtener sumando una serie de hidrogramas unitarios de duración T , desfasados en T y luego dividiendo el hidrograma resultante por la intensidad de la lluvia efectiva correspondiente ($1/T$), (para que corresponda a una lluvia de 1 mm/1 hora y no a una de 1mm/ T horas).



Luego:

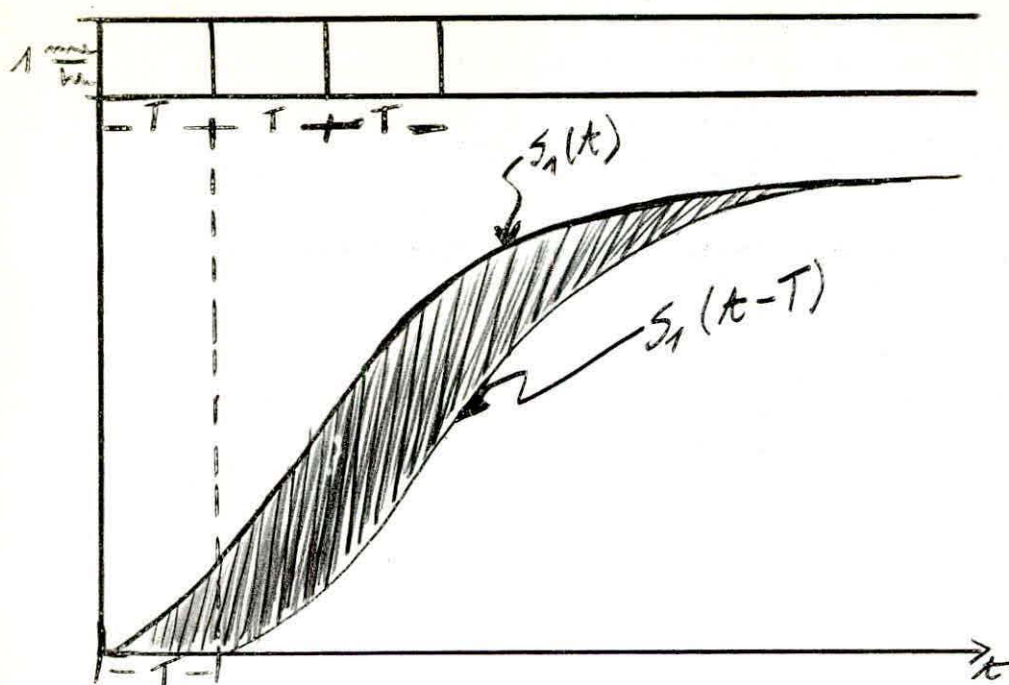
$$S(t) = T \left[u(T, t) + u(T, t-T) + \dots + u(T, t-kT) + \dots \right]$$

Si el tiempo base de los H.U. parciales es T_b , entonces una lluvia efectiva continúa de intensidad $1/T$ (1 mm en T horas) producirá un gasto constante después de T_b horas. Por lo tanto, se requiere combinar solamente T_b/T hidrogramas unitarios para obtener el hidrograma en S correspondiente a una duración T, alcanzándose una ordenada de equilibrio igual a la intensidad de la lluvia efectiva.

La tabla siguiente indica en forma tabular el procedimiento para obtener un hidrograma en S.

1	2	3	4	5
Tiempo	Ordenadas de H.U. para duración T $u(T, t)$	Ordenadas H.U. desfasadas en T	$S(t)$ para para lmm/T hra.	$S(t)$ para para lmm/1 hra.
t_1	a	0	a+0	$T(a+0)$
t_2	b	0	b+0	$T(b+0)$
t_3	c	0	c+0	$T(c+0)$
duración	d	0	d+0	$T(d+0)$
del	e	0	e+0	$T(e+0)$
H.U.				
original	f	a+0	f+a+0	$T(f+a+0)$
	g	b+0		
	h	c+0		
	i	d+0		
	j	e+0	j+e+0	
	k	a+f+0	k+a+f+0	
	l	b+g+0		
	m	c+h+0		
	n	d+i+0		
	p	e+j+0	p+e+j+0	$T(p+e+j+0)$
	etc.	etc.	etc.	etc.

En la figura aparecen 2 hidrogramas en S desfasados T horas. El hidrograma $S_1(t-T)$ será el que se producirá si la lluvia efectiva hubiera comenzado T horas después.



Evidentemente, el área comprendida entre los hidrogramas $S_1(t)$ y $S_1(t-T)$ corresponde entonces al efecto de la lluvia que se produce entre $t = 0$ y $t = T$. Por lo tanto, de acuerdo a la definición de hidrograma en S , la diferencia de dos hidrogramas en S desfasados en T será igual al hidrograma de duración T .

Debido a que cada hidrograma en S representa el gasto que produce una lluvia efectiva de 1 mm/hora, el volumen del hidrograma de duración T que se obtiene será de $T \times 1\text{mm}$, por lo que es necesario dividir sus ordenadas por T para obtener el H.U. final buscado.

Luego,

$$u(T, t) = \frac{1}{T} [S(t) - S(t-T)]$$

Algunas veces la curva del hidrograma en S tiende a presentar ondulaciones en torno a una línea de equilibrio. Esta situación puede deberse a que el H.U. original que se usó para la obtención del hidrograma en S no tenía efectivamente la duración T que se le determinó, a que la cuenca no se comporta como un sistema lineal, a que la lluvia efectiva no es uniforme en el tiempo y el espacio o incluso a algunos errores en los datos iniciales. Si estas fluctuaciones se deben sólo al efecto de una determinación incorrecta de la duración del H.U., se puede hacer variar ésta hasta que se eliminen las fluctuaciones, encontrándose así la duración adecuada.

5.- Obtención de Hidrogramas Unitarios para lluvias de intensidad variable.

Si en la cuenca en estudio no se dispone de observaciones suficientes para obtener el hidrograma unitario a partir de lluvias efectivas aisladas de intensidad sensiblemente constante y de los correspondientes hidrogramas simples, se puede recurrir a métodos aproximados que aprovechen los datos disponibles de tormentas e hidrogramas complejos. Existen dos situaciones posibles.

En caso que ocurran diferentes chubascos continuados dentro de cada una de las lluvias o tormentas estudiadas, y que éstas a su vez produzcan "peaks" bien definidos en los respectivos hidrogramas, se deberá separar el hidrograma complejo en los hidrogramas simples que correspondan a cada uno de los chubascos dentro de la lluvia considerada. Luego, cada uno de estos hidrogramas simples se usa para determinar un hidrograma unitario según se explicó más atrás.

Si los hidrogramas complejos observados y los respectivos pluviogramas no se prestan para su separación en eventos simples, o si la intensidad de la lluvia efectiva considerada no se mantiene sensiblemente constante en la duración considerada, será necesario aplicar los procedimientos que se indican a continuación.

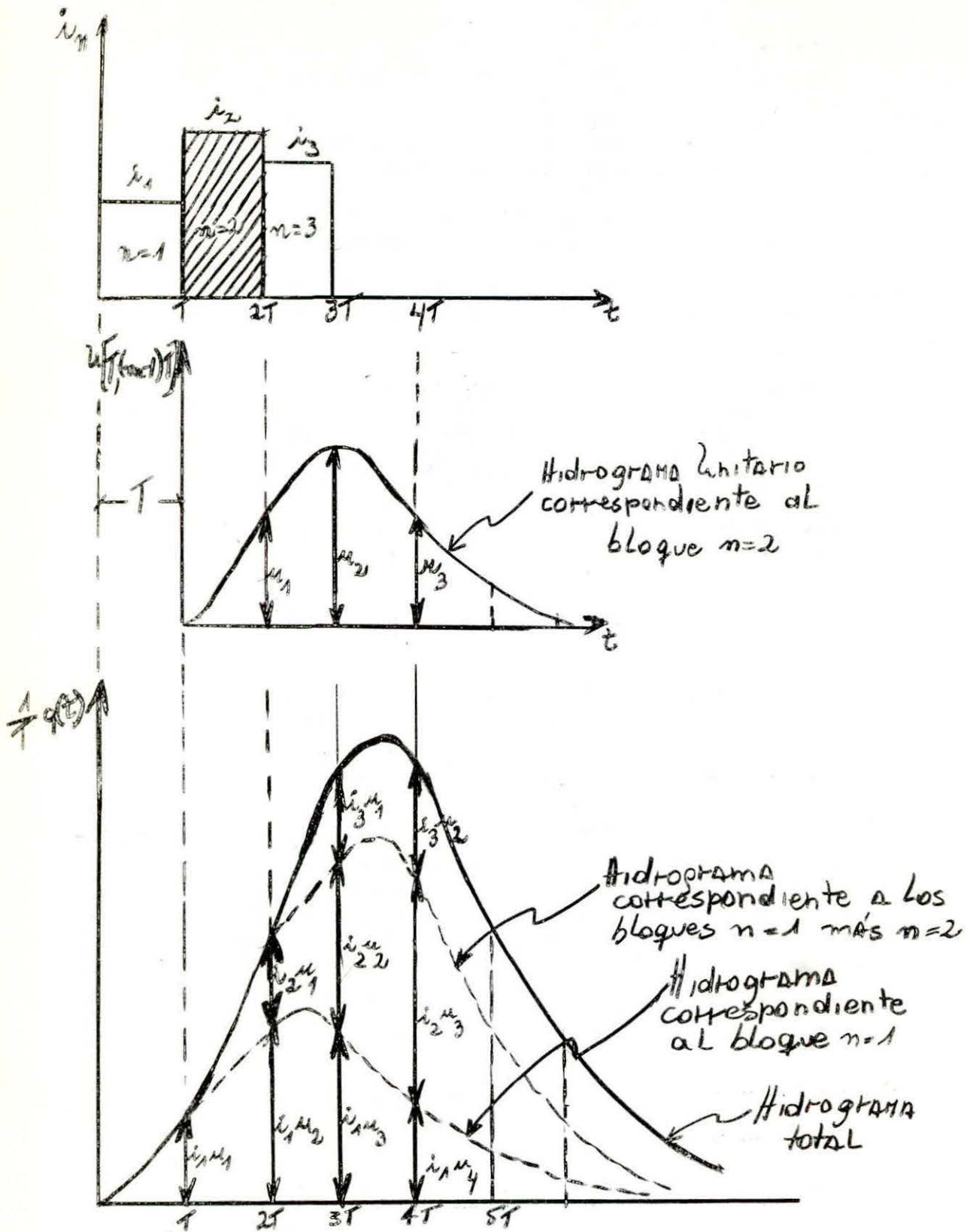
Supongamos una lluvia efectiva de duración total T_1 . Si la intensidad no se mantiene constante en ese tiempo, el respectivo hidrograma se puede descomponer en "n" bloques de duración T cada uno y de intensidad media i . A cada uno de estos bloques de lluvia efectiva le corresponderá un hidrograma unitario de duración T . Por lo tanto, para un tiempo $t = m \cdot T$, la contribución al hidrograma resultante de un bloque de lluvia de intensidad i_n será:

$$\Delta q(t) = \Delta q(mT) = i_n \cdot T \cdot u \left[T, (m-n)T \right]$$

Según el principio de superposición, la contribución de todos los bloques de lluvia que ocurren antes de " $t = mT$ ", es igual a

$$q(t) = q(mT) = \sum_{n=1}^{n=m} i_n \cdot T \cdot u \left[T, (m-n)T \right]$$

La relación anterior se puede expresar gráficamente con el ejemplo de la figura, que indica el hidrograma resultante de una lluvia efectiva descompuesta en tres bloques de duración T y de intensidad constante i_n cada una ($n = 1, 2, 3$).



En que u_i son las ordenadas del H.U. de duración T .

Llamando

$$q_i = q(mT)$$

en general, de acuerdo al principio de superposición y considerando que la lluvia efectiva ha sido dividida en un número n de episodios menor que el número m de ordenadas del hidrograma unitario correspondiente al tiempo T , se tiene que:

$$\frac{1}{T} q(T) = \frac{1}{T} q_1 = i_1 u_1$$

$$\frac{1}{T} q(2T) = \frac{1}{T} q_2 = i_1 u_2 + i_2 u_1$$

$$\frac{1}{T} q(3T) = \frac{1}{T} q_3 = i_1 u_3 + i_2 u_2 + i_3 u_1$$

$$\frac{1}{T} q_n = i_1 u_n + i_2 u_{n-1} + \dots + i_n u_1$$

$$\frac{1}{T} q_{n+1} = i_1 u_{n+1} + i_2 u_n + \dots + i_n u_2$$

$$\frac{1}{T} q_{n+k} = i_1 u_{n+k} + i_2 u_{n+k-1} + \dots + i_n u_{k+1}$$

$$\frac{1}{T} q_m = i_1 u_m + i_2 u_{m-1} + \dots + i_n u_{m-n+1}$$

$$\frac{1}{T} q_{m+1} = i_2 u_m + \dots + i_n u_{m-n+2}$$

$$\frac{1}{T} q_{m+n-2} = \dots + i_{n-1} u_m + i_n u_{m-1}$$

$$\frac{1}{T} q_{m+n-1} = \dots + i_n u_m$$

Es decir, el hidrograma total resulta de la composición de "n" hidrogramas desfasados en T y correspondientes a cada uno de los bloques en que se ha dividido la lluvia efectiva.

El sistema de ecuaciones indicado más arriba se puede expresar en forma matricial, de la siguiente manera:

$$\boxed{\frac{1}{T} \{q\} = [u] \{i\}}$$

en que:

- $\{q\}$ es la matriz columna correspondiente a los gastos del hidrograma total para los tiempos T, 2T, 3T, ..., (m+n-1)T.
- $[u]$ es una matriz de la forma

$$\begin{array}{rcl}
 u_1 & 0 & 0 \dots \dots \dots 0 \\
 u_2 & u_1 & 0 \dots \dots \dots 0 \\
 u_3 & u_2 & u_1 \dots \dots \dots 0 \\
 \\
 u_n & u_{n-1} & \dots \dots \dots u_1 \\
 u_{n+1} & u_n & \dots \dots \dots u_2 \\
 \\
 [u] = & u_{n+k} & u_{n+k-1} \dots \dots \dots u_{k+1} \\
 \\
 u_m & u_{m-1} & \dots \dots \dots u_{m-n+1} \\
 0 & u_m & \dots \dots \dots u_{m-n+2} \\
 \\
 0 & 0 & 0 \quad u_m \quad u_{m-1} \\
 0 & 0 & 0 \quad 0 \quad 0 \quad u_m
 \end{array}$$

y de orden $(n+m-1)$ por n .

- Los u_i ($i = 1, \dots, m$) corresponden a las ordenadas del H.U. de duración T , distanciadas en T a partir del comienzo de la lluvia efectiva.

- $\{i\}$ es la matriz columna $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ con n términos, correspondientes a las intensidades medias i_n de los diferentes bloques de lluvia efectiva considerada.

También se podrá escribir que:

$$\boxed{\{q\} = [i] \{u\}}$$

De acuerdo a las relaciones anteriores se deduce que el problema de obtener el H.U. correspondiente a una lluvia de intensidad variable, se reduce a resolver un sistema de ecuaciones lineales en base a los valores conocidos de "q" y de "i".

Sin embargo, este método presenta algunos problemas en relación a los errores numéricos que pueden cometerse. En efecto, cualquier error inicial en " q_1 " e " i_1 " repercute en el cálculo de todas las ordenadas del H.U. Los errores que se cometan en estimar los incrementos de gasto, las variaciones espaciales y temporales de la lluvia durante los diversos períodos conducen por lo tanto a errores acumulativos en la determinación del H.U.

Un método adecuado para solucionar este tipo de problemas consiste en el método estadístico de mínimos cuadrados, de manera que en base a datos registrados de " q " y de " i "

se determinen los "u" de manera que la suma de los cuadrados de las desviaciones (errores), sea mínima en las $n+m-1$ ecuaciones establecidas anteriormente. Este procedimiento debe usarse para varias crecidas registradas y obtener luego un H.U. promedio. Este método es por lo tanto laborioso pero hoy en día es posible utilizarlo sistemáticamente gracias al empleo de computadores digitales electrónicos.

6.- Comentario general sobre el H.U.:

En la práctica, todas las hipótesis teóricas y prácticas en que se basa el H.U. no se cumplen rigurosamente. Por lo tanto, no se justifica efectuar correcciones demasiado detallistas en la derivación del H.U. de una crecida, si los datos de otra crecida igualmente conveniente provee otro H.U. diferente que puede diferir por ejemplo en un 20%.

Como ya se ha hecho notar, siempre será preferible obtener hidrogramas usando datos de lluvias intensas y de corta duración y que, por lo tanto, producen crecidas simples. La ventaja de ello no es solamente que el proceso de cálculo es más sencillo y sujeto a menos errores acumulativos, sino que en las lluvias de este tipo las variaciones de la distribución de la intensidad son menos importantes. Sin embargo, en algunas cuencas es prácticamente imposible disponer de lluvias intensas de corta duración, que produzcan una crecida suficiente. En estas condiciones sólo se podrán utilizar lluvias de duración mayor.

Este último punto es importante por cuanto, para el uso del H.U. en la predicción de crecidas interesa haber determinado el H.U. en base a crecidas grandes representativas del orden de magnitud de aquellas crecidas que se pretende predecir.

También será necesario tener en cuenta las condiciones iniciales que tenía la cuenca al momento de producirse las crecidas que se usan para determinar el H.U., ya que es lógico que las condiciones de los suelos determinan la mayor o menor rapidez con que se genera la crecida en el río.

A pesar de todo este tipo de problemas y sobre todo a la limitada validez que tienen las hipótesis referentes a la linealidad e invariancia de la cuenca, el uso del H.U. constituye una técnica hidrológica de indudable utilidad práctica, mientras no se puedan solucionar los problemas teóricos y prácticos mencionados y se desarrollan nuevos procedimientos que contemplen estas limitaciones.

7.- Usos del hidrograma unitario:-

Para una cuenca dada, su H.U. de cierta duración puede emplearse como un índice de las potencialidades de crecidas de la cuenca.

Por ejemplo, para una lluvia de diseño de cierta duración, se puede estimar cuál va a ser el gasto máximo que se puede esperar, el tiempo en que éste se produce, o bien, cuál es el hidrograma total de la crecida. Evidentemente, debido a la definición de H.U., para llegar a estos valores será necesario estimar un valor del flujo base en el momento de la crecida. Conjuntamente, será necesario estimar o asumir un

valor de las abstracciones de la lluvia de diseño, considerando por ejemplo un coeficiente de escorrentía, algún índice de infiltración o curvas medias de infiltración en la cuenca.

La predicción de hidrogramas de crecidas utilizando sólo el H.U. y datos de lluvias, constituye un elemento importante en el dimensionamiento de obras hidráulicas de evacuación y control de crecidas en cuencas donde no se dispone de estadísticas extensas de gastos, pero sí, de datos pluviométricos. Además, este tipo de aplicaciones tiene una gran utilidad en el aviso y predicción a corto plazo de los posibles efectos de una lluvia que se esté desarrollando.