

U N I V E R S I D A D D E S O N O R A

ESCUELA DE AGRICULTURA Y GANADERIA

" APLICACION DEL METODO DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO  
UTILIZANDO EL HIDROGRAMA UNITARIO PARA LA OBTENCION DE  
AVENIDAS DE DISEÑO "

D I S E R T A C I O N

MARTIN HUMBERTO HERNANDEZ AGUILAR

JULIO DE 1985.

# Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos  
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



"APLICACION DEL METODO DE RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO UTILIZANDO  
EL HIDROGRAMA UNITARIO PARA LA OBTENCION DE AVENIDAS DE DISEÑO."

DISERTACION

SOMETIDA A LA CONSIDERACION DE LA  
ESCUELA DE AGRICULTURA Y GANADERIA  
DE LA  
UNIVERSIDAD DE SONORA  
POR  
MARTIN HUMBERTO HERNANDEZ AGUILAR

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO  
AGRONOMO CON ESPECIALIDAD EN IRRIGACION.

JULIO DE 1985.



# INDICE

	PAGINA
INTRODUCCION . . . . .	1
LITERATURA REVISADA. . . . .	2
CONCLUSIONES . . . . .	26
RECOMENDACIONES . . . . .	27
BIBLIOGRAFIA : . . . . .	28



## INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes que se presentan al diseñar obras hidráulicas de aprovechamiento o de protección, es determinar la avenida de diseño, esto es la avenida máxima o gasto máximo - que una obra en particular deberá manejar sin que le ocurran daños.

En muchas ocasiones, el diseñador se encuentra con poca o ninguna información de mediciones directas que le permitan conocer la historia de los escurrimientos en el sitio de interés, por lo que tiene que recurrir a estimarlos a partir de los datos de precipitación.

Por ello, es necesario contar con metodos que permitan estimar los escurrimientos a partir de las características de la lluvia generada en una cuenca.

En este trabajo se presenta el método del hidrograma unitario, el cual permite llevar a cabo la relación lluvia-escurrimiento, en forma sencilla y de resultados aceptablemente buenos, comparados con los que se obtienen al aplicar otros métodos.



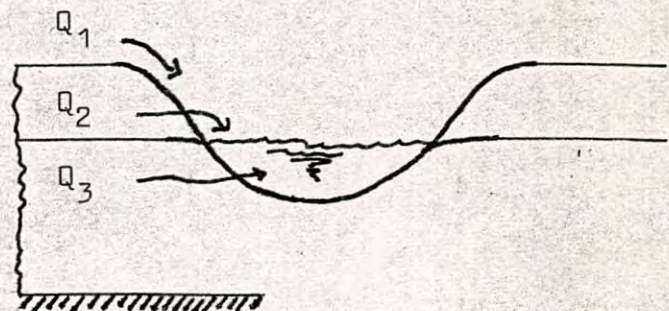
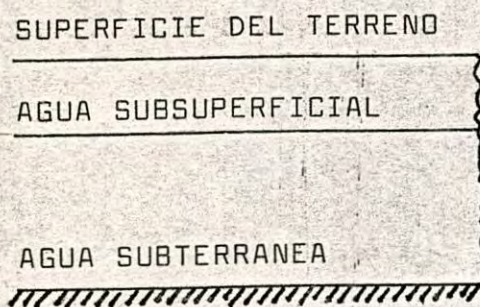
## LITERATURA REVISADA

El agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico, proveniente de la atmósfera se denomina precipitación, esto origina lo que se conoce como escurrimiento; esto es, la parte de lluvia que ni se infiltra en el terreno ni se pierde por evaporación y que, por consiguiente, discurre libremente sobre la superficie del suelo formando cursos de agua superficial.

Para entender mejor el concepto de escurrimiento es conveniente describir el proceso que se sigue para su formación. El agua de lluvia llega primero a los objetos que se encuentran sobre la superficie del terreno como árboles, casas, pastos, etc., en estos lugares parte de la lluvia es interceptada y parte llega al suelo, en donde se infiltra, llena las depresiones topográficas y se va acumulando en el terreno hasta romper la tensión superficial y fluir por la superficie de las laderas hacia las cauces.

De este modo, parte del agua que conducen los ríos se debe al flujo por las superficies, sin embargo pueden existir otras dos contribuciones: el agua subsuperficial y el agua subterránea.

La primera fluye casi paralela a la superficie a poca profundidad, y la segunda se debe al agua que se encuentra en la zona de saturación del subsuelo. (1,2)



FLUJOS QUE ALIMENTAN UN RIO

$Q_1$  = FLUJO SUPERFICIAL

$Q_2$  = FLUJO SUBSUPERFICIAL

$Q_3$  = FLUJO SUBTERRANEO



El escurrimiento se ha clasificado en dos clases:

- Escurrecimiento Directo
- Escurrecimiento Base

Escurrecimiento Directo: aparece siempre que la intensidad de la tormenta sea mayor que la capacidad de infiltración del terreno, está formado por los flujos de superficie y subsuperficial rápido, y representa el mayor porcentaje de volumen en una avenida.

Escurrecimiento Base: es el escurrimiento sostenido por un período largo de no lluvia y está formado por los flujos subsuperficial lento y el subterráneo y no depende de la lluvia de la tormenta inmediata anterior. (7)

La relación entre precipitación y escurrimiento depende por una parte de las características de la cuenca y por otra de la distribución de la lluvia en la cuenca y en el tiempo.

La cuenca de drenaje de una corriente es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte de todo flujo de la corriente principal y sus tributarios. Está limitada por su parteaguas, que es una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento originado por la precipitación, que en cada sistema de corriente fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida. (14)

PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE UNA CUENCA: Desde el punto de vista de las relaciones lluvia-escurrimiento, las características de la cuenca interesan principalmente en dos aspectos:

- a) El volumen de escurrimiento producido por una tormenta dada.
- b) La forma del hidrograma, la cual depende de la velocidad de respuesta de la cuenca al presentarse una tormenta.

ESTAS CARACTERISTICAS SON:

- a) AREA DE LA CUENCA (A).

El área drenada de una cuenca es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas.

- b) LONGITUD DE CAUCE.(L).

Se acostumbra medir como la longitud del cauce principal en sentido horizontal.



c) PENDIENTE DEL CAUCE.

La pendiente media de una cuenca se define como la media ponderada de las pendientes de todas las superficies elementales para las -- que se puede considerar que la línea de máxima pendiente es -- constante. La ecuación correspondiente es:

$$S = \frac{L}{L_1 / \sqrt{S_1} + L_2 / \sqrt{S_2} + \dots + L_m / \sqrt{S_m}}$$

DONDE:

m = Número de tramos de pendiente uniforme sobre el cauce principal.

$L_i$  = Longitud del tramo i

$S_i$  = Pendiente del tramo i

(9)

El escurrimiento total (Formado por el escurrimiento directo y el escurrimiento base) origina, en las corrientes que drenan las cuencas, fluctuaciones de gasto, las cuales pueden registrarse por medio de un hidrograma. (13)

HIDROGRAMA. Se llama hidrograma a cualquier grafico que relaciona alguna propiedad del flujo de agua de un cauce, tal como caudal, velocidad, calado, etc., con el tiempo. En la práctica suele entenderse por hidrograma la gráfica en la que se representa el gasto que pasa por una sección particular de un río, como función del tiempo --  $Q = f(t)$ .

Los principales parámetros que definen la forma del hidrograma suponiendo que la intensidad de la lluvia es constante a lo largo del tiempo y uniforme sobre toda la superficie de la cuenca son:

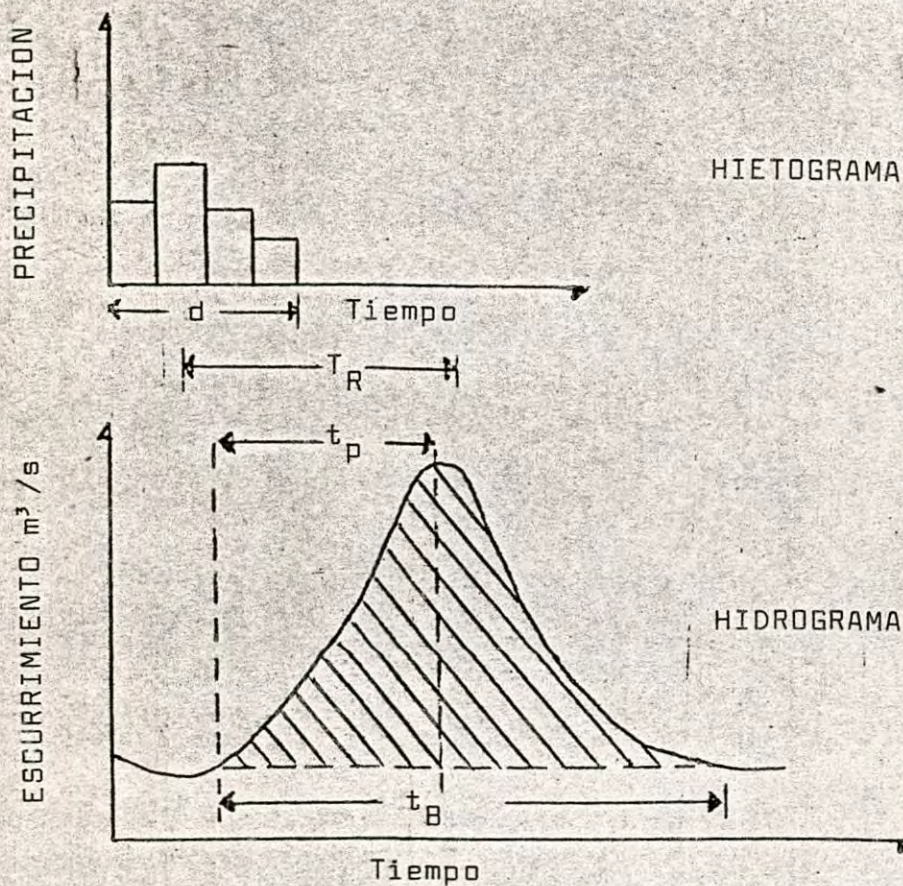
- a) El volumen de escurrimiento directo  $V_{ed}$  (área sombreada)
- b) El tiempo de concentración  $t_c$  que se define como el tiempo que tarda una gota de agua que cae en el punto más alejado de la cuenca, -



en llegar al lugar de salida de la misma.

- c) Tiempo de pico  $t_p$ . Es el tiempo que transcurre entre el momento en que se inicia el escurrimiento directo y el momento en que alcanza su valor máximo.
- d) Tiempo de retraso  $T_R$ . Es el que transcurre entre el centroide del Hietograma de precipitación efectiva y el gasto máximo o de pico.
- e) Tiempo Base  $t_B$ . Es el tiempo que dura el escurrimiento directo.  
(1, 10, 15)

Estos parámetros se muestran en la siguiente figura:



Existe gran variedad de modelos precipitación-escurrimiento - en México, debido a la información disponible de sus cuencas, se utilizan los siguientes:

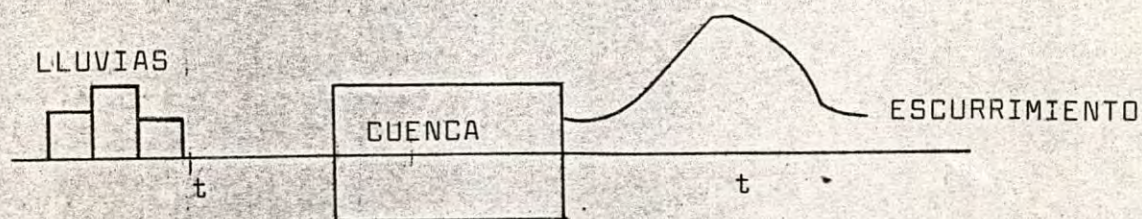
- a) Modelos que requieren únicamente las principales características físicas promedio de la cuenca.



b) Modelos para los que es necesario contar con registros simultáneos de precipitación y escurrimiento.

Al primer grupo corresponden las fórmulas empíricas, las que han sido obtenidas relacionando mediciones simultáneas de lluvia y de escurrimiento con las características de las cuencas.

Al segundo grupo se conoce como modelos de Caja Negra; se calibran a partir de los datos de ingreso y salida de la cuenca, sin tomar en cuenta explícitamente sus características físicas, A este grupo pertenece el método del hidrograma unitario. (9)



APLICACION DEL CONCEPTO DE SISTEMA A RELACION LLUVIA-ESCURRIMIENTO.

METODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO.

El método del hidrograma unitario fue propuesto por Le Roy-Sherman en el año de 1932.

Tiene por objeto determinar el hidrograma de escurrimiento superficial en la salida de una cuenca a partir del pluviograma de la tormenta correspondiente.

Para su aplicación es necesario contar con una estación de aforos de gastos en la salida de la cuenca considerada y con una estación pluviográfica.

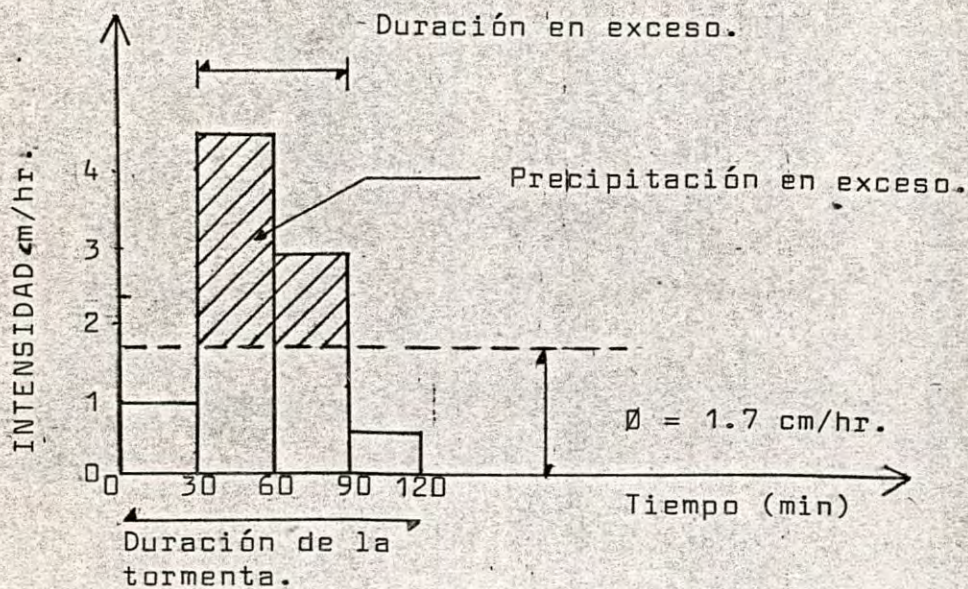


El hidrograma unitario de una cuenca se define como el hidrograma del escurrimiento directo, resultante de un centímetro de lluvia en exceso, generada uniformemente sobre la cuenca, con una intensidad también uniforme durante un período específico de tiempo o duración en exceso.

La lluvia en exceso es la parte de la precipitación que origina el escurrimiento directo.

La duración en exceso, es el tiempo que dura la lluvia en exceso.

El uso de este método se ha extendido principalmente para el cálculo de los caudales de avenida. (1, 13)



## H I E T O G R A M A

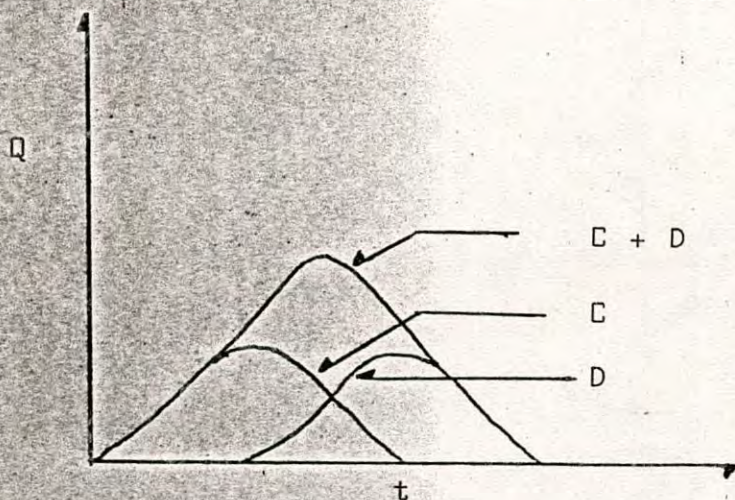
HIPOTESIS EN QUE SE BASA EL METODO.

1. La lluvia efectiva se distribuye uniformemente en tiempo.
2. La lluvia efectiva se distribuye uniformemente sobre toda la cuenca.



3. La base o duración del hidrograma de escurrimiento directo debido a una lluvia efectiva de duración unitaria es constante.
4. Las ordenadas de hidrogramas de escurrimiento directo con un mismo tiempo base ( $t_B$ ) son directamente proporcionales al volumen total de escurrimiento directo representado por cada hidrograma. Este principio se conoce como principio de linealidad, - superposición o proporcionalidad y nos dice que las ordenadas - de los hidrogramas son mutuamente proporcionales y se pueden sumar numéricamente en proporción al volumen total.

Se representa mediante la figura siguiente: ,



#### OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO.

El hidrograma unitario se determina a partir de registros si multáneos de lluvia y escurrimientos de la siguiente manera:

1. Se escoge una tormenta aislada de intensidad más o menos uniforme y de duración adecuada y se calcula su hidrograma.
2. Se obtiene el hidrograma de escurrimiento directo separándolo - del escurrimiento base por alguno de los métodos disponibles.
3. Se calcula el volumen de escurrimiento directo utilizando la ecuación:

$$Ved = \Delta t \sum_{i=1}^n Q_i$$



DONDE:

$V_{ed}$  = Volumen de escurrimiento directo en  $m^3$

$\Delta t$  = Intervalo de tiempo en segundos

$Q_i$  = Gasto de escurrimiento directo en el  $i$ -esimo intervalo de tiempo, en  $m^3/s$

4. Se obtiene la altura de la lamina de escurrimiento directo ( $Le$ ) como.

$$Le = \frac{V_{ed}}{Ac} \times 100$$

DONDE:

$Ac$  = Area de la cuenca en  $m^2$

5. Se calculan las ordenadas del hidrograma unitario, dividiendo cada una de las ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo entre la lamina de escurrimiento directo ( $Le$ ).

6. Se calcula el hidrograma de precipitación efectiva, utilizando el procedimiento adecuado y se obtiene con ello la duración de lluvia efectiva ( $d_e$ ) asociada al hidrograma unitario calculado en el paso anterior.

Una manera de encontrar la magnitud de la precipitación efectiva, es utilizando el coeficiente de infiltración, ya sea obtenido de la curva de capacidad de infiltración de Horton o tomando un valor según el tipo de suelo o del uso que se le dé al mismo; afectando el hidrograma de la lluvia total por este coeficiente de infiltración se obtendrá la altura de lluvia efectiva y la duración de ésta.

Un hidrograma unitario obtenido de una sola tormenta, no es satisfactorio, por lo que conviene obtener varios hidrogramas unitarios de la misma duración y deducir de ellos un hidrograma unitario medio (calculando el promedio de los gastos máximos y de los tiempos a los picos de los hidrogramas, asegurando que su volumen sea unitario). (5, 9 y 13)

OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO PARA DURACIONES DIFERENTES A LA ORIGINAL.



## CURVA "S"

Para transformar un hidrograma unitario correspondiente a una cierta duración, a otro cuya duración sea diferente a la primera, se requiere aplicar la técnica de la Curva "s", que es simplemente el hidrograma total resultante de una serie de tormentas consecutivas de intensidad uniforme con una lamina de lluvia efectiva de 1 cm. en  $d_1$  (h) sobre la cuenca, es decir es el hidrograma de escurrimiento directo de una lluvia continua con intensidad de  $\frac{1}{d_1} \left( \frac{\text{cm}}{\text{hr}} \right)$ .

Si se desea encontrar el hidrograma unitario para un período de tiempo  $d_2$  (hr), es necesario graficar de nuevo la curva "s" con un desplazamiento de  $d_2$  (hr). La diferencia entre sus ordenadas representará el escurrimiento de una lluvia de exceso de  $d_2$  (hr) de duración y una intensidad de  $\frac{1}{d_1} \left( \frac{\text{cm}}{\text{hr}} \right)$ ; entonces dicha diferencia deberá multiplicarse por  $\frac{d_1}{d_2}$  de modo que la intensidad de la lluvia sea  $\frac{1}{d_2} \left( \frac{\text{cm}}{\text{hr}} \right)$ , que es la intensidad que debe tenerse para un hidrograma unitario correspondiente a  $d_2$  (hr).

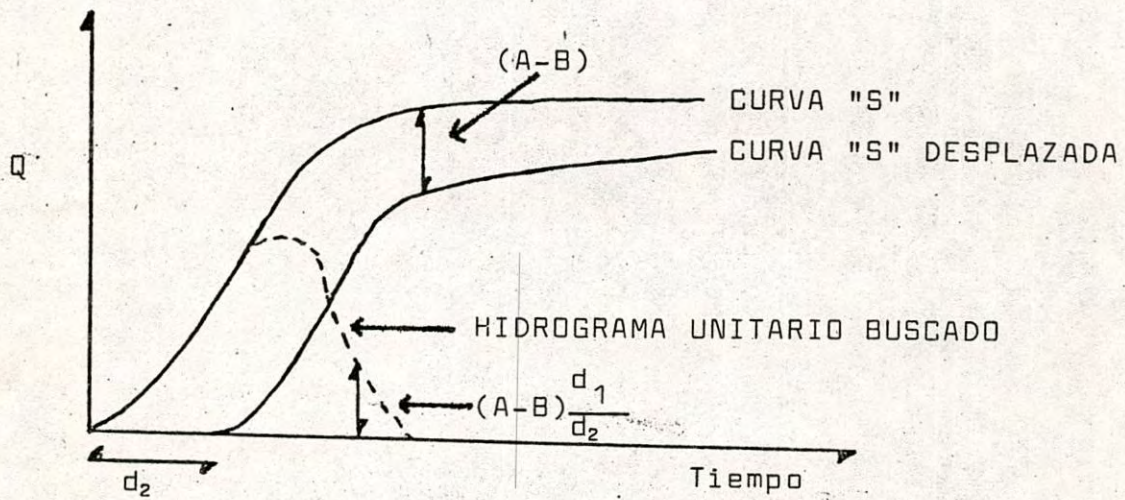
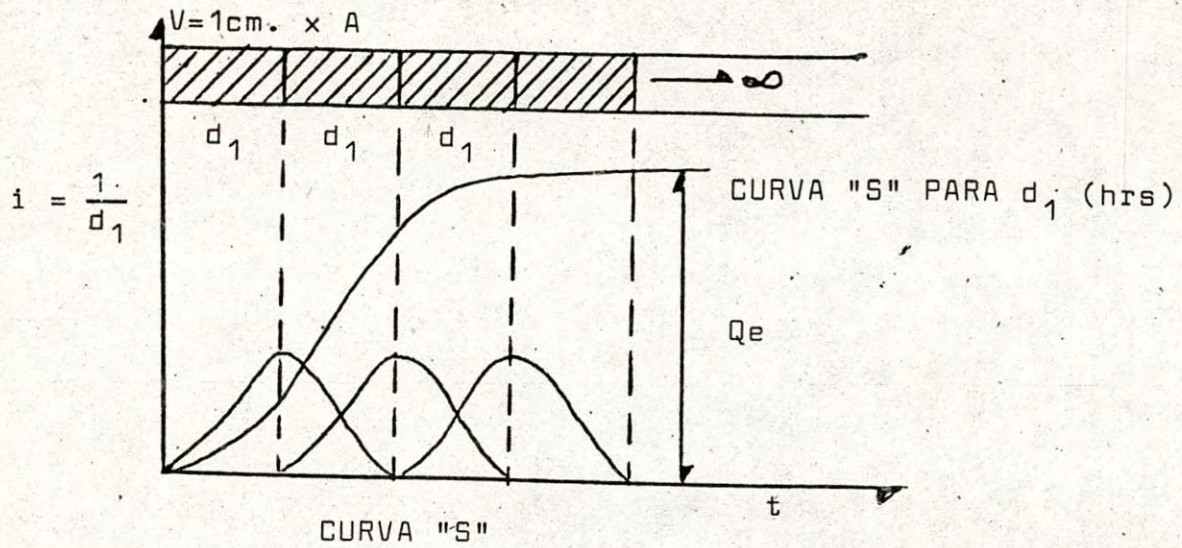
EL METODO CONSTA DE LOS SIGUIENTES PASOS:

- a) Se obtiene la curva "s", que corresponderá a la duración en exceso del hidrograma unitario conocido  $d_1$  (hr).
- b) Se desplaza la curva "s"  $d_2$  (hr)
- c) Se obtiene la diferencia entre ambas, la cual representa un hidrograma producido por una lluvia cuya intensidad vale  $\frac{1}{d_1} \left( \frac{\text{cm}}{\text{hr}} \right)$  con una duración en exceso de  $d_2$  (hr).
- d) El hidrograma anterior se multiplica por  $\frac{d_1}{d_2}$  y el resultado representa las ordenadas del hidrograma unitario buscado.(3,9)

La teoría del hidrograma unitario ha originado las técnicas del hidrograma unitario sintético y del hidrograma unitario triangular. métodos



que no se discutirán, y que en dado caso se pueden ver en las referencias (5,7).



- $A$  = Area de la Cuenca.
- $i$  = Intensidad de la lluvia.
- $Q_e$  = Gasto de equilibrio.
- $d_1$  = Duración de la lluvia en hora.



EJEMPLO:

OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO PARA LA CUENCA DEL RIO LA PAROTA.

La cuenca del Río La Parota tiene una superficie de  $1701.4 \text{ km}^2$ . Sus escurrimientos son registrados por la estación hidrométrica Zitzícuaro y la estación pluviográfica más cercana es la estación de Uruapan.

En septiembre de 1975 se obtuvieron los siguientes datos:

DIA	HORA	Q(m <sup>3</sup> /s) OBSERVADO	DIA	HORA	Q(m <sup>3</sup> /s) OBSERVADO
11	8:00	46.00	12	20:00	515.00
11	10:00	47.00	12	22:00	435.00
11	12:00	55.00	12	24:00	375.00
11	14:00	65.00	13	2:00	295.00
11	16:00	80.00	13	4:00	250.00
11	18:00	100.00	13	6:00	220.00
11	20:00	130.00	13	8:00	190.00
11	22:00	175.00	13	10:00	165.00
11	24:00	235.00	13	12:00	150.00
12	2:00	460.00	13	14:00	130.00
12	4:00	1230.20	13	16:00	115.00
12	6:00	1075.00	13	18:00	100.00
12	8:00	925.00	13	20:00	90.00
12	10:00	860.00	13	22:00	80.00
12	12:00	780.00	13	24:00	75.00
12	14:00	715.00	14	2:00	70.00
12	16:00	650.00	14	4:00	65.00
12	18:00	580.00			

De acuerdo con la teoría antes mencionada, para la construcción del hidrograma unitario se siguen los siguientes pasos:

1. SEPARACION DEL ESCURRIMIENTO DIRECTO Y EL DE BASE.

En la columna 3 del cuadro (1), se obtiene el escurrimiento base del hidrograma de la tormenta, trazando una recta horizontal que parte del punto de inflexión que muestra el inicio del escurrimiento directo y llega hasta donde corta al hidrograma. En este caso el escurrimiento base es constante e igual a  $46 \text{ m}^3/\text{s}$ . (Fig. 1)(7,12) En la columna 4 se obtiene el escurrimiento directo restando el escurrimiento base estimado del escurrimiento observado.



## 2. CALCULO DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO DIRECTO.

La suma de los valores de escurrimiento directo espaciados dos horas es de 9918.2 m<sup>3</sup>/s, por lo que el volumen de escurrimiento directo es igual a:

$$V_{ed} = \Delta t \sum_{i=1}^n Q_i = (2 \text{ hs.}) (3600 \text{ Seg/hr}) (9918.2 \text{ m}^3/\text{Seg.}) = 71\,411\,040 \text{ m}^3$$

## 3. CALCULO DE LA ALTURA DE PRECIPITACION EFECTIVA.

La altura de precipitación efectiva se obtiene dividiendo el volumen de escurrimiento directo arriba calculado, entre el área de la cuenca.

$$L_e = \frac{V_{ed}}{A_c} \times 100 = \frac{71,411,040 \text{ m}^3}{1701.4 \times 10^6 \text{ m}^2} \times 100 = 4.2 \text{ cm.}$$

## 4. OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO.

Las ordenadas del hidrograma unitario (columna 5), se obtienen dividiendo las del hidrograma de escurrimiento directo entre la altura de precipitación efectiva.

Para saber a qué duración (efectiva de la lluvia) corresponde este hidrograma unitario, se efectúan los siguientes calculos:

5. CALCULO DEL INDICE DE INFILTRACION MEDIA.  $\phi$ . Este índice se obtiene por tanteos, hasta encontrar el valor de  $\phi$  que hace que la lluvia efectiva sea igual a la calculada en el paso 3. En este caso  $\phi = 0.21 \text{ cm/hr}$  (Fig. 2), es decir  $\phi = \frac{\phi'}{\Delta t} = \frac{0.84}{4} = 0.21 \text{ cm/hr}$ .

## 6. CALCULO DEL HIETOGRAMA DE PRECIPITACION EFECTIVA.

El hietograma de precipitación efectiva que se muestra en la parte superior de la figura 2, se obtiene restando la infiltración al hietograma de precipitación total. Se observa que la duración de la lluvia en exceso es de 8 hs., por lo que el hidrograma unitario determinado corresponde a una duración de 8 hs., y una lluvia de 1 cm.

La Fig. No. 3 representa gráficamente el hidrograma unitario obtenido. (8,13)



OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO

1	2	3	4	5
HORA	ESCURRIMIEN- TO OBSERVA- DO m <sup>3</sup> /s.	ESCURRIMIEN TO BASE. m <sup>3</sup> /s.	ESCURRI--- MIENTO DI- RECTO m <sup>3</sup> /s	ORDENADAS DEL H.U. m <sup>3</sup> /s.
8:00	46.0	46.0	0	0
10:00	47.0	46.0	1	0.238
12:00	55.0	46.0	9	2.143
14:00	65.0	46.0	19	4.524
16:00	80.0	46.0	34	8.095
18:00	100.0	-	54	12.857
20:00	130.0	-	84	20.000
22:00	175.0	-	129	30.714
24:00	235.0	-	189	45.000
2:00	460.0	-	414	98.571
4:00	1230.2	-	1184.2	281.952
6:00	1075.0	-	1029	245.000
8:00	925.0	-	879	209.286
10:00	860.0	-	814	193.810
12:00	780.0	-	734	174.762
14:00	715.0	-	669	159.286
16:00	650.0	-	604	143.810
18:00	580.0	-	534	127.143
20:00	515.0	-	469	111.667
22:00	435.0	-	386	92.619
24:00	375.0	-	329	78.333
2:00	295.0	-	249	59.286
4:00	250.0	-	204	48.571
6:00	220.0	-	174	41.429
8:00	190.0	-	144	34.286
10:00	165.0	-	119	28.333
12:00	150.0	-	104	24.762
14:00	130.0	-	84	20.000
16:00	115.0	-	69	16.429
18:00	100.0	-	54	12.857
20:00	90.0	-	44	10.476
22:00	80.0	-	34	8.095
24:00	75.0	-	29	6.905
2:00	70.0	-	24	5.714
4:00	65.0	-	19	4.524

Σ 9918.2

CUADRO 1 = Obtención del Hidrograma Unitario.



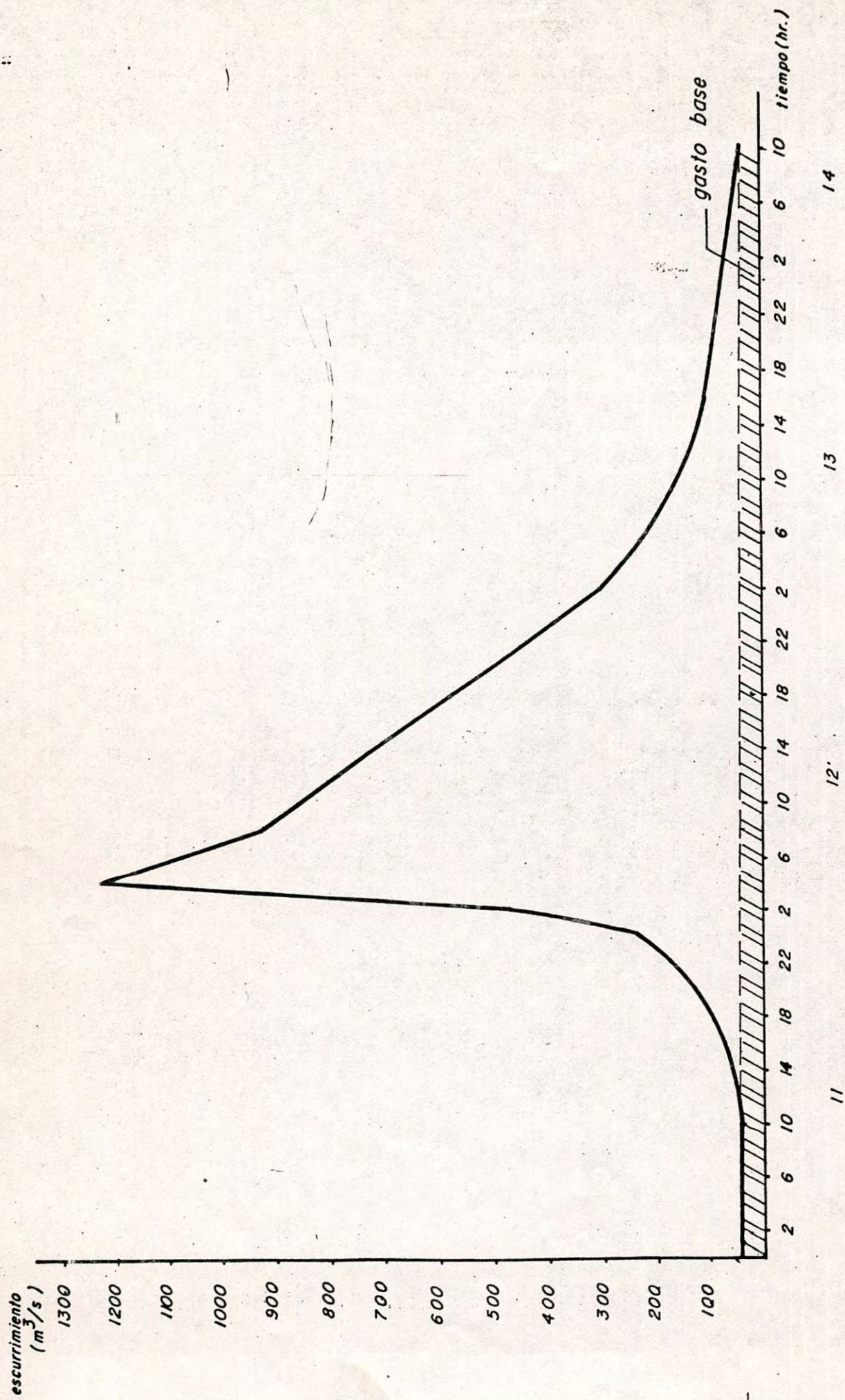


Fig. 1.- Hidrograma de escurrimiento total



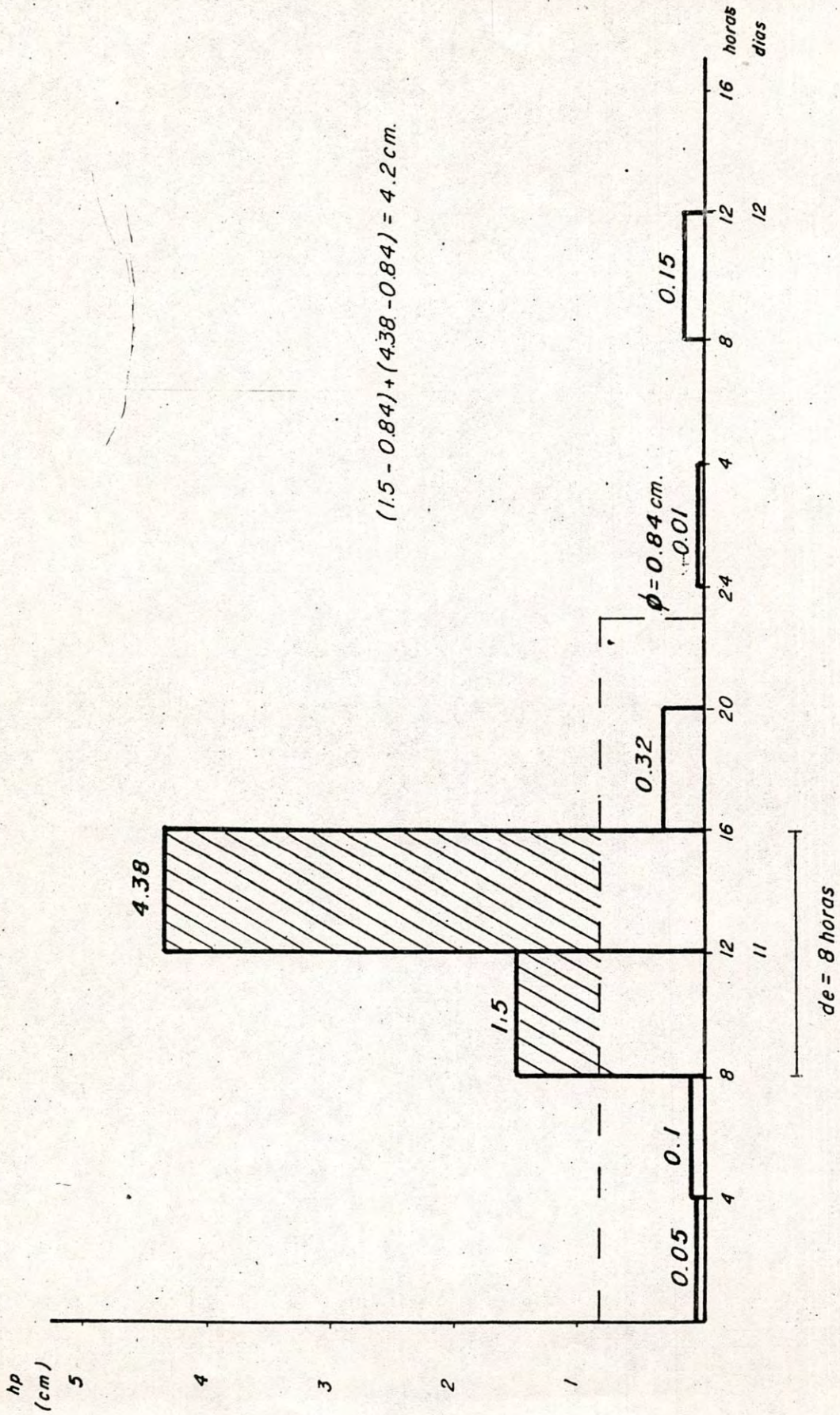


Fig. 2.- Hietograma de la lluvia en exceso registrada por la estación pluviográfica Uruapan.



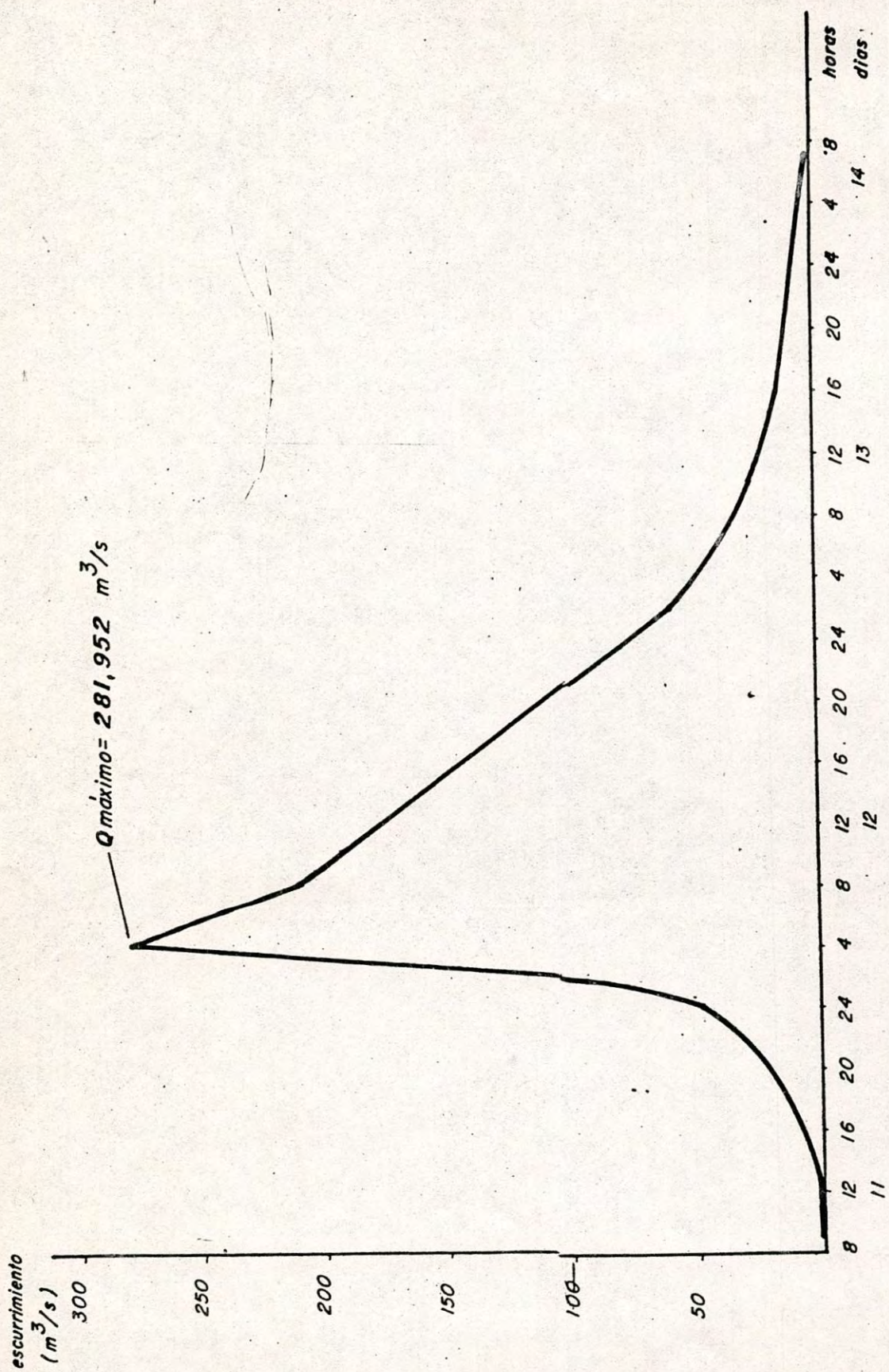


Fig. 3.- Hidrograma unitario para la cuenca del rio La Parota, producido por una lluvia en exceso de ocho horas de duracion.



## APLICACION DE LA CURVA "S"

### OBTENCION DEL HIDROGRAMA UNITARIO PARA UNA DURACION DIFERENTE.

Como se dijo anteriormente en la teoría, si deseamos conocer el hidrograma unitario para una tormenta de diferente duración que aquella para la que se calculó originalmente, debemos utilizar el método de la curva "S".

#### EJEMPLO:

Se desea obtener el hidrograma unitario asociado a una duración de 4 hrs., los pasos son los siguientes:

- a) Se desplazará varias veces el hidrograma unitario obtenido, un tiempo de 8 horas que es la duración de la lluvia en exceso para la que fue deducido. (columnas 3 y 6 cuadro No. 2)
- b) Se suman las ordenadas de los hidrogramas desplazados (Col. 7).
- c) Con los valores anteriores se obtiene el hidrograma "S" ajustado. (Col. 8, cuadro 2 y fig. 4)
- d) Se desplaza el hidrograma "S" una vez, un tiempo de 4 horas. (Col. 4, cuadro 3 y Fig. 4)
- e) Se restan las ordenadas del inciso d. (Col. 5, cuadro No. 3)
- f) Estas diferencias obtenidas se multiplican por la relación entre la duración asociada al hidrograma unitario original y la duración que se requiere; en este caso  $8/4$ .
- g) Los datos obtenidos en f, corresponden a las ordenadas del hidrograma unitario asociado a una duración de 4 hrs. (Fig. 5) (9)

### DETERMINACION DE LA AVENIDA MAXIMA.

En la mayor parte de los proyectos hidráulicos, especialmente para las estructuras que tienen un gran volumen de almacenamiento (presas), La avenida de diseño es la máxima avenida probable que se define como la mayor avenida que puede esperarse razonablemente en una corriente determinada en un punto que se elija o sitio de presa considerado.



Calculo del hidrograma S

CUADRO 2

1	2	3	4	5	6	7	8
hora	H.U. para de = 8 hr.	H.U. desplazado 8 hr.	H.U. desplazado 16 hr.	H.U. desplazado 24 hr.	H.U. desplazado 32 hr.	Hidrograma S	Hidrograma S ajustado
08:00	0					0	0
10:00	0.238					0.238	0.238
12:00	2.143					2.143	2.143
14:00	4.524					4.524	4.524
16:00	8.095	0				8.095	8.095
18:00	12.857	0.238				13.095	13.095
20:00	20.000	2.143				22.143	22.143
22:00	30.714	4.524				35.738	35.738
24:00	45.000	8.095	0			53.095	53.095
02:00	98.571	12.857	0.238			111.666	111.666
04:00	281.952	20.000	2.143			304.095	304.095
06:00	245.000	30.714	4.524			280.238	462.500
08:00	209.286	45.000	8.095	0		262.381	545.000
10:00	193.810	98.571	12.857	0.238		305.476	578.500
12:00	174.762	281.952	20.000	2.143		304.095	591.200
14:00	159.286	245.000	30.714	4.524		280.238	591.200
16:00	143.810	209.286	45.000	8.095	0	262.381	591.200
18:00	127.143	193.810	98.571	12.857	0.238	305.476	-
20:00	111.667	174.762	281.952	20.000	2.143	478.857	-
22:00	92.619	159.286	245.000	30.714	4.524	439.524	-
24:00	78.333	143.810	209.286	45.000	8.095	406.191	-
02:00	59.286	127.143	193.810	98.571	12.857	432.381	-
04:00	48.571	111.667	174.762	281.952	20.000	588.381	-
06:00	41.429	92.619	159.286	245.000	30.714	527.619	-
08:00	34.286	78.333	143.810	209.286	45.000	510.715	-
10:00	28.333	59.286	127.143	193.810	98.571	507.143	-
12:00	24.762	48.571	111.667	281.762	281.952	641.714	-
14:00	20.000	41.429	92.619	159.286	245.000	-	-



Calculo del hidrograma S

CUADRO 2

1	2	3	4	5	6	7	8	
hora	H.U. para de = 8 hr.	H.U. desplazado 8 hr.	H.U. desplazado 16 hr.	H.U. desplazado 24 hr.	H.U. desplazado 32 hr.	Hidrograma S	Hidrograma S ajustado	
16.00	16.429	34.286	78.333	143.810	209.286			
18.00	12.857	28.333	59.286	127.143	193.810			
20.00	10.476	24.762	48.571	111.667	174.762			
22.00	8.095	20.000	41.429	92.619	159.286			
24.00	6.905	16.429	34.286	78.333	143.810			
02.00	5.714	12.857	28.333	59.286	127.143			
04.00	4.524	10.476	24.762	48.571	111.667			
06.00		8.095	20.000	41.429	92.619			
08.00		6.905	16.429	34.286	78.333			
10.00		5.714	12.857	28.333	59.286			
12.00		4.524	10.476	24.762	48.571			
14.00			8.095	20.000	41.429			
16.00			6.905	16.429	34.286			
18.00			5.714	12.857	28.333			
20.00			4.524	10.476	24.762			
22.00				8.095	20.000			
24.00				6.905	16.429			
02.00				5.714	12.857			
04.00				4.524	10.476			
06.00					8.095			
08.00					6.905			
10.00					5.714			
12.00					4.524			
14.00								
16.00								
18.00								
	EL GASTO DE EQUILIBRIO DE LA CURVA "S" SE CALCULA CON LA FORMULA					Qe=2.78 A	(4)	
						de		



Calculo del hidrograma unitario con el hidrograma S

CUADRO 3

1	2	3	4	5	6
hora	hidrograma unitario para 8 horas	curva S tomada del cuadro 2	curva S desplazada 4 horas	(3 - 4)	ordenadas del H.U. para 4 horas
08.00	0	00		00	00
10.00	0.238	0.238		0.238	0.476
12.00	2.143	2.143	0	2.143	4.286
14.00	4.524	4.524	0.238	4.286	8.572
16.00	8.095	8.095	2.143	5.952	11.904
18.00	12.857	13.095	4.524	8.571	17.142
20.00	20.000	22.143	8.095	14.048	28.096
22.00	30.714	35.238	13.095	22.143	44.286
24.00	45.000	53.095	22.143	30.952	61.904
02.00	98.571	111.666	35.238	76.428	152.856
04.00	281.952	304.095	53.095	251.000	502.000
06.00	245.000	462.500	111.666	350.834	701.668
08.00	209.286	545.000	304.095	240.905	481.810
10.00	193.810	578.500	462.500	116.000	232.000
12.00	174.762	591.200	545.000	46.200	92.400
14.00	159.286	591.200	578.500	12.700	25.400
16.00	143.810	591.200	591.200	0	0
18.00	127.143	-	591.200		
20.00	111.667	-	591.200		
22.00	92.619	-	-		
24.00	78.333	-	-		
02.00	59.286	-	-		
04.00	48.571	-	-		
06.00	41.429	-	-		
08.00	34.286	-	-		
10.00	28.333	-	-		
12.00	24.762	-	-		
14.00	20.000	-	-		
16.00	16.429	-	-		







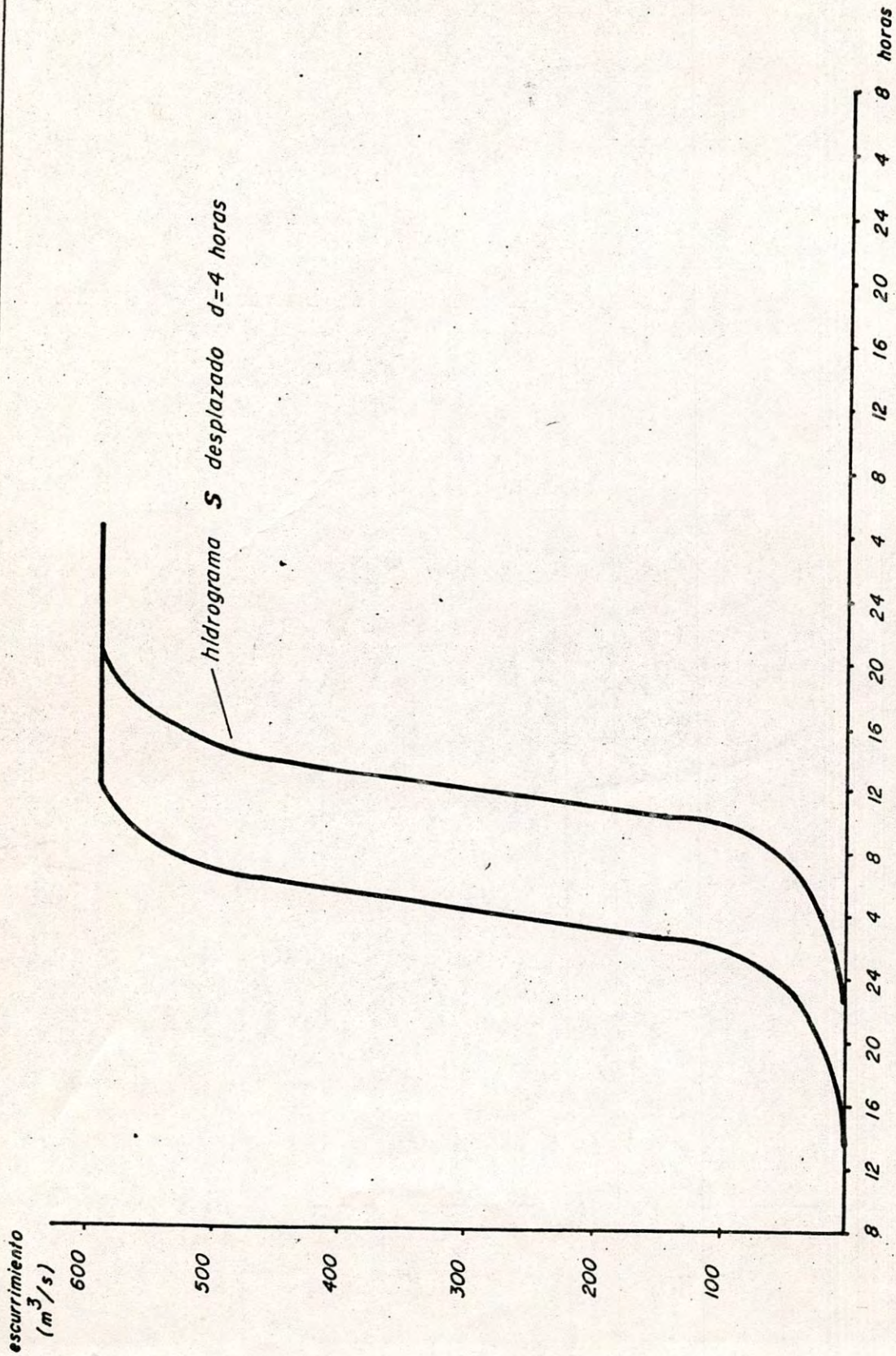


Fig. 4.- Hidrograma S deducido a partir de un hidrograma unitario con de = 8 horas.



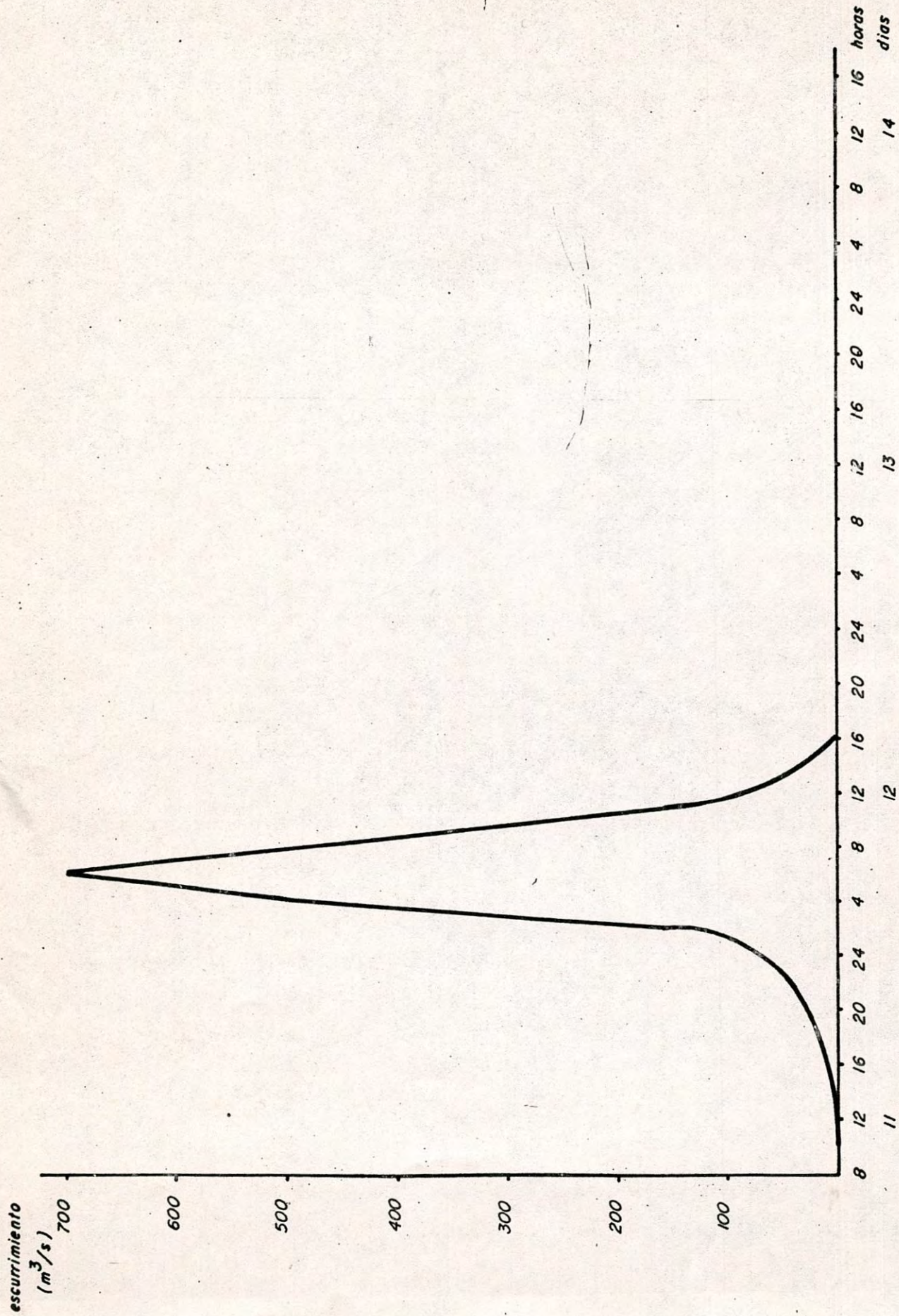


Fig. 5... Hidrograma unitario para una  $de = 4$  horas



La determinación de la avenida máxima probable se basa en la consideración racional de las probabilidades de la ocurrencia simultánea de los diferentes elementos o condiciones que contribuyen a la formación de la avenida.

La adopción de una avenida de diseño menor que la avenida máxima probable es una decisión administrativa que dependerá de la importancia de la obra y de la vida útil de ésta, y que debe hacer el propietario, la dependencia oficial a la organización responsable de la construcción del proyecto. (16)

Para aplicar el método de hidrograma unitario se requiere procesar los datos de lluvia y escurrimiento en la siguiente forma:

1. Cálculo de curvas de intensidad-duración-período de retorno para la cuenca en estudio.

Estas curvas permiten tener un conocimiento de la variación de las características de la intensidad o de la precipitación con respecto a su frecuencia de incidencia (período de retorno).

El análisis se realiza para cada duración, ajustando a los valores máximos anuales una función de distribución de probabilidad. Los pasos son los siguientes:

- a) Se selecciona una duración de interés.
- b) De cada tormenta registrada se obtiene la intensidad de lluvia máxima para la duración seleccionada.
- c) De cada año de registro se obtiene el máximo de los valores obtenidos en el inciso b.
- d) A las intensidades máximas anuales, para la duración seleccionada, se les ajusta una función de distribución de valores extremos (generalmente es una función de tipo Gumbel), de tal manera que relacione la magnitud de la intensidad con el período de retorno correspondiente. Para esto se ordenan de mayor a menor los valores de precipitación máxima calculados en el inciso c para cada duración, y se les asigna un número de orden (m).

El período de retorno ( $T_r$ ) se calcula con la siguiente ecuación:



$$T_r = \frac{N+1}{m}, \quad \text{donde: } \begin{array}{l} N = \text{Número total de años de registro} \\ m = \text{Número de orden} \end{array}$$

- e) El proceso se repite desde el inciso b, para considerar otras duraciones de interés.
2. Determinación del coeficiente de infiltración para cada avenida registrada, y trazo de una gráfica de variación de capacidad de infiltración respecto al tiempo en que se presentó dicha avenida.
  3. Se obtienen los hidrogramas unitarios para las diferentes duraciones de lluvia en exceso. (Utilizando la Curva "S")
  4. Una vez que se ha hecho esto para aplicar el método, se hace lo siguiente.
    - a) Se escoge el período de retorno de la tormenta de diseño.
    - b) Se supone una duración de tormenta.
    - c) Con el período escogido en a y la duración supuesta de b, se calcula la altura de precipitación con base en las curvas de intensidad-duración-período de retorno.
    - d) Se calcula el hietograma de la tormenta para la altura de precipitación obtenida.
    - e) Con el hietograma deducido en el inciso anterior y escogiendo el valor del coeficiente de infiltración más desfavorable, se calcula la altura de lluvia en exceso y la duración en exceso de la tormenta.
    - f) Conocida la duración de la lluvia en exceso se observa a que hidrograma unitario -obtenido, en el paso 3- corresponde. La multiplicación de las ordenadas del hidrograma unitario escogido por la altura de lluvia en exceso del paso anterior, da como resultado la avenida de diseño. Esta avenida corresponde a una tormenta cuya duración se supuso en b paso 4. A esta avenida se le agrega el escurrimiento base, y será esta la avenida que deberá usarse al proyectar una obra hidráulica. (6, 8 y 13)



## CONCLUSIONES

La conversión de las lluvias en escurrimiento superficial es un proceso complejo que depende tanto de la distribución espacial de las lluvias como de las características del suelo en cada parte de la cuenca, esta complejidad ha dado lugar a que se desarrolle una gran cantidad de métodos para calcular los escurrimientos a partir de las lluvias.

Los métodos estadísticos tienen como principal limitación el contar con una muestra relativamente pequeña (15 a 25 años) de registros, con la cual la ley de probabilidades que se obtiene con el ajuste es de un alto grado de incertidumbre. Esto se agrava porque en la mayoría de las zonas del País las tormentas máximas pueden ser de tipo convectivo o ciclónico y por esto, la muestra corresponde a dos poblaciones diferentes, siendo entonces más difícil la aplicación de estos métodos.

Otra limitación de los métodos estadísticos es que con ellos se infiere sólo el valor del gasto máximo, y por tanto se requiere hacer algunas hipótesis adicionales para definir la forma de las avenidas.

La principal desventaja de los métodos empíricos, se debe a que son obtenidos de relaciones estadísticas deducidas con datos de otras regiones, cuya extrapolación conduce a resultados muy controvertibles.

El método del hidrograma unitario (de los métodos de relación lluvia-escurrimiento) si bien tiene la limitación principal de desconocer la distribución real de la lluvia en algunas zonas del País, en la que la densidad de pluviómetros es escasa, evitando con esto tener registros continuos de precipitación y escurrimiento de la cuenca en estudio, tiene la ventaja sobre los otros métodos de permitir conocer el hidrograma de la avenida, así como su gasto máximo.



## RECOMENDACIONES

Debido a los principios teóricos en que se basa el método del hidrograma unitario, es necesario seleccionar adecuadamente los datos hidrológicos a utilizar, es decir, las tormentas seleccionadas deben ser de corta duración; (la experiencia señala que la duración de la tormenta debe ser aproximadamente  $1/4$  del tiempo de retraso de la cuenca, -tiempo desde el centro de masa de la lluvia hasta el pico del hidrograma unitario-) ya que así es más probable encontrar una lluvia intensa y uniforme que produzca un H.U. bien definido y de tiempo base corto.

Ahora bien, algunas cuencas son tan grandes, que una tormenta cubre únicamente una porción de la cuenca; no es aconsejable utilizar hidrogramas unitarios para cuencas con áreas mayores de  $5000 \text{ km}^2$  a menos que sea aceptable una exactitud inferior. Sin embargo es preferible dividir una gran cuenca en subáreas, utilizar hidrogramas unitarios para cada subárea independiente y combinar los hidrogramas resultantes aplicando las técnicas para análisis o tránsito de avenidas.

Por último, podemos decir que es necesario y muy conveniente ampliar la red de estaciones hidrométricas y pluviográficas, extendiéndolas a cuencas poco examinadas para un mejor control del agua, aprovechándola en la realización de proyectos de aprovechamiento y a la vez utilizar la red ya existente para estudios de investigaciones estableciendo cuencas experimentales y representativas, con las que se pudiera conocer realmente el comportamiento del agua de escurrimiento y así mejorar su utilización.



## B I B L I O G R A F I A

1. Benitez, Alberto. 1972. Captación de Aguas Subterráneas; nuevos métodos de prospección y de cálculo de caudales. 2ª Ed. Editorial Dossat, S.A. Madrid, España. 80, 81, 86, 97. pp.
2. Campos, A. D.F. 1984. Proceso de Ciclo Hidrológico. Tomo 2/2, Vol. II, Ed. Universitaria Potosina. 28, 29, 30. pp.
3. Flores, W. Emigdio. 1978. Apuntes de Hidrología Superficial. Hermosillo, Sonora, México. Impreso por la Universidad de Sonora. 122. pp.
4. Linsley-Kohler-Paulus. 1975. Hidrología para Ingenieros. 2ª Ed. Editorial Mc. Graw-Hill. Latinoamericana, S.A., México. 198. pp.
5. Linsley-Franzini. 1980. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. 11ª Impresión. C.E.C.S.A., México. 63. pp.
6. México. Comisión Federal de Electricidad. 1980. Manual de Diseño de Obras Civiles; Hidrotecnia. Avenida de Diseño. Sección a Tema 1, Capitulo 10. Instituto de Investigaciones Electricas. 7 pp.
7. México. Comisión Federal de Electricidad. 1980. Manual de Diseño de Obras Civiles; Hidrotecnia. Escurrimiento Sección a Tema 1 capítulo 3. Instituto de Investigaciones Electricas. 2, 8, pp.



8. México. Comisión Federal de Electricidad. 1980. Manual de Diseño de Obras Civiles; Hidrotecnia. Precipitación Sección a Tema 1, capítulo 2. Instituto de Investigaciones Electricas. 12 pp.
9. México. Comisión Federal de Electricidad. 1980. Manual de Diseño de Obras Civiles; Hidrotecnia. Relación entre Precipitación y Escurrimiento. Sección a, Tema 1, Capítulo 5. Instituto de Investigaciones Electricas 3, 11, 12, y 15. pp.
10. Marerey Rascon Laura E. 1977. El Agua de Escurrimiento en la República Mexicana. 22 y 23. pp.
11. Meinzer Oscar E. 1949. Hidrology. Dover publications Inc. New York. 514 y 517. pp.
12. Viessman W. Jr. T.E. Harbaugh y S.W. Knapp. 1977. Introduction to Hydrology. 2ª Edición. Harper Ana Row Publishers. New York. 121, 122. pp.
13. Springall G. Rolando. 1967. Escurrimiento en Cuencas Grandes. Series del Instituto de Ingeniería, UNAM No. 146, Sep. 4, 5, 16, 17, 35. pp.
14. Springall G. Rolando. 1970. Hidrología. 1ª parte. UNAM, México, D.F. 7 pp.



15. Stanley S. Butler. 1972. Engineering Hidrology. Civil Engineerin And Angineering. Mechanics Series. Ed. Prentice Hall Inc. EE. UU. 296 y 297. pp.
  
16. United States. Departament of the Interior. 1982. Diseño de presas Pequeñas. Cía. Editorial Continental, S.A. de C.V., México. 53. pp.