

721
29



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

**MÉTODOS PARA LA DETERMINACION DE LA AVENIDA
DE DISEÑO DE OBRAS HIDRAULICAS**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a :

MARIO ALBERTO NARRO FLORES



México, D. F.

1985



Universidad Nacional
Autónoma de México

UNAM



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

I - Introducción	1
II - Conceptos Básicos	
II.A) Ciclo Hidrológico	5
II.B) La Cuenca	6
II.C) Precipitación	9
II.D) Escurrimiento e Infiltración	19
III - Determinación de la Avenida de Diseño	
III.A) Información de Control Climatológico e Hidrométrico Simultáneo. Procedimiento de Hidrograma Unitario, Curva "S" e Hidrograma Unitario Instantáneo	26
III.B) Información de Control Climatológico y Características Fisiográficas.	
III.B.1) Procedimiento de Precipitación Máxima Probable	34
III.B.2) Método de Chow	45
III.B.3) Método Racional	52
III.B.4) Método de I-Pai-Wu	53
III.B.5) Método de Regionalización de Gumbel	59
III.B.6) Método Empírico Gregory-Arnold ...	65
III.C) Información de Características Fisiográficas.	
III.C.1) Método Empírico de Creager	71
III.D) Información de Control Hidrométrico	
III.D.1) Método Estadístico de Gumbel	73
III.D.2) Método Estadístico de Nash	80
IV - Conclusiones y Recomendaciones.....	84

I - INTRODUCCION

La vida sedentaria del hombre se inició cuando se convirtió en Agricultor. Para ello, fué necesario que se estableciera en las cercanías e incluso márgenes de los ríos y de los lagos.

Desde entonces y hasta nuestros días, su necesidad de aprovechar el agua para su desarrollo y la de defenderse de la misma debido a las inundaciones causadas por el desbordamiento de los ríos, le han impulsado a construir las llamadas Obras Hidráulicas.

Dentro de éstas Obras se encuentran las Presas, Bordos Perimetrales, etc., cuyas funciones son primordialmente almacenar volúmenes de agua para épocas de estiaje, desviar el agua para ciertos aprovechamientos, cambiar el régimen de la corriente a régimen de demanda, etc.

Sin embargo, la capacidad de almacenaje de una Obra Hidráulica es limitada, y el hombre debe prever las condiciones extraordinarias que pudieran presentarse en un momento dado y que afectarían no solo la estabilidad de la estructura, sino muy posiblemente a vidas humanas. La condición extraordinaria a la que se hace mención y cuya determinación es el objetivo de éste documento, es la llamada Avenida de Diseño, la cuál, es un volumen de agua que por sus características de magnitud y distribución en el tiempo, presenta las condiciones más desfavorables para su control al llegar a la presa y durante su trayecto en el cauce, pudiendo inundar áreas de asentamientos humanos adyacentes al río.

Los diferentes Métodos existentes para la Determinación de la Avenida de Diseño, ó Avenida Máxima, son objeto de estudio de la Hidrología, Ciencia que trata

sobre el agua, sus propiedades, ocurrencia y distribución sobre y debajo de la superficie terrestre, así como su influencia en el Medio Ambiente.

Para la determinación de Avenidas deben reunirse y estudiarse de la cuenca, si se tienen, todos los datos concernientes a Localización Geográfica, Potencial de las Tormentas, Areas de Drenaje, Suelos y material que los cubra, así como la Distribución del Escurrimiento.

Asimismo, el Ingeniero que haga el estudio de las Avenidas debe, si le es posible, hacer un recorrido de inspección sobre la cuenca para verificar las divisorias del área de drenaje y los datos sobre lo que cubre el suelo, y para determinar si se han incluido áreas que no son tributarias dentro de las divisorias de drenaje. El recorrido debe también incluir visitas a las cuencas vecinas si es que se prevee el uso de los registros de las cuencas vecinas en el Estudio.

Los valores de los gastos máximos de las Avenidas se obtienen con mayor facilidad que los valores de los volúmenes, por tanto, se dispone de mayor número de datos sobre las descargas máximas. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, el volumen de escurrimiento asociado a una descarga máxima y el tiempo de su distribución es de vital importancia para los proyectistas, que generalmente necesitan el hidrograma de la Avenida de Diseño.

El detalle con el que es necesario hacer los cálculos hidrológicos para preparar el estudio de Avenidas depende del carácter y aplicabilidad de los datos disponibles sobre aforos y precipitación, y también de la relación entre el costo del vertedor al costo total del proyecto.

Cabe aclarar que el costo del vertedor (Parte de la presa que sirve para eliminar los volúmenes de agua que no pueden ser almacenados por la Capacidad Util de la presa) en las regiones de elevada precipitación, hace de la

Construcción de la obra una erogación sumamente alta.

Para los proyectos importantes, cuando el costo del vertedor de desahíos constituye una gran parte del costo del proyecto, teniendo por tanto gran importancia en la viabilidad del mismo, se debe hacer el mejor uso posible de los datos de aforo. Los registros de los aforos proporcionan la relación que existe entre la precipitación de una tormenta y el escurrimiento y datos sobre la distribución de éste último; la determinación de la Avenida Máxima Probable debe basarse en un estudio, que en el mejor de los casos, debe incluir el potencial de las tormentas y del escurrimiento, así como la distribución de éste en relación con las características fisiográficas de la cuenca. Cada corriente y cada estación de aforos de un área de drenaje constituye un problema individual, debido a la distribución variable y a las diferentes características del Escurrimiento en cada caso.

Sin embargo, en muchas ocasiones la cuenca en estudio no cuenta con pluviógrafos y/o pluviómetros que nos permitan obtener información sobre el potencial de las tormentas y de la misma forma sucede con las estaciones hidrométricas, ya que no todas las cuencas tienen en su cauce principal ó en el sitio que nos interesa, el Aforo de gastos que nos permitan conocer su magnitud, variaciones y relación con la Precipitación.

En consecuencia, la forma de obtener la Avenida de Diseño depende en la mayoría de los casos de la información que se tenga disponible de la cuenca en estudio.

Este conjunto de procedimientos para su determinación que componen el presente trabajo, no pretende involucrar a todos los existentes, pero sí a los más utilizados en la Ingeniería Hidrológica.

II - CONCEPTOS BASICOS.

A. CICLO HIDROLOGICO

El Ciclo Hidrológico es el recorrido periódico que realiza el agua desde su Evaporación en Mares, Lagos y Rios, hasta su regreso a ellos en estado líquido.

En forma general, se considerará que el ciclo se inicia con la Evaporación en el Mar (Ya que por ser un ciclo, puede iniciar en cualquier punto de él) y que el agua tiene el siguiente recorrido:

El Sol irradia energía a las superficies expuestas de agua aumentando la temperatura de ésta y evaporándola. El vapor de agua forma las nubes, las cuáles son arrastradas por el viento hacia puntos más altos y fríos, hasta que la temperatura ha descendido lo suficiente para que se condense el vapor de agua, con lo que se origina la precipitación.

Una parte de la precipitación es interceptada por árboles y plantas, otra parte se evapora antes de llegar a la superficie terrestre, y otra parte alcanza el suelo. De ésta última porción de la precipitación, una parte se infiltra en el suelo y la otra escurre hacia los ríos y/o lagos, los ríos desembosan al mar, con lo cuál se cierra el ciclo. El agua que no llega a los ríos, sino a los lagos ó depósitos cerrados, permanece en ellos hasta su evaporación, con lo que el ciclo se inicia nuevamente. El agua que se infiltra en el suelo puede toparse con mantos impermeables que se hagan volver a la superficie y escurrir (Manantiales, Ojos de agua, etc.) ó bien llegar hasta corrientes subterráneas de agua, las que desembocan finalmente al mar, cerrando de ésta forma el Ciclo Hidrológico.

B. LA CUENCA.

Cuenca es el área que contribuye al Escurrimiento Superficial y proporciona el Gasto a la corriente principal. El elemento hidrológico de una Obra Hidráulica es precisamente la Cuenca, ya que es la superficie que va a influir para la construcción y cálculos de la misma.

El tamaño de la cuenca, así como su pendiente, número de cauces que contenga, tipo de suelo, etc. definirán al escurrimiento que se tenga en ella.

Las cuencas son limitadas por el Parteaguas, que es una línea imaginaria que une los puntos topográficos más altos.

B.1) Área de la Cuenca.

Es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas.

B.2) Pendiente de la Cuenca.

Existen algunos métodos para calcular la pendiente de la cuenca. Se mencionará brevemente el Método de Nash.

Sobre un plano de la cuenca con curvas de nivel, se traza una malla de cuadrados, éstos deben ser al menos 100 dentro de la cuenca.

Cada nudo de la malla tiene una pendiente. Esta pendiente será igual a la división del desnivel de las curvas de nivel que rodeen al nudo, entre la distancia mínima entre éstas dos curvas de nivel pasando por el nudo.

Cuando un nudo se encuentre dentro de una curva de nivel cerrada, su pendiente será nula.

Cuando un nudo esté exactamente sobre una curva de nivel, la distancia que se tomará será la menor del nudo

a la curva adyacente más próxima.

La pendiente media en la cuenca será igual a:

$$S_c = \frac{\text{Suma de pendientes de nudos}}{\text{Número de nudos}}$$

Para el número de nudos, no se considerarán las pendientes nulas.

B.3) Elevación de la Cuenca

Sirve para conocer el nivel topográfico de la cuenca sobre el nivel del mar. Se usa también la malla de cuadrados, y cada nudo tiene su elevación.

La Elevación de la cuenca será igual a:

$$E_c = \frac{\text{Suma de Elevaciones de nudos}}{\text{Número de Nudos}}$$

B.4) Red de Drenaje.

La longitud de todas las corrientes dentro de la cuenca es llamada Longitud de Tributarios, y la Densidad de Drenaje (D_d) es igual a la longitud de tributarios entre el Area de la cuenca.

La Densidad de Corriente (D_c) es igual al número de corrientes entre el Area de la cuenca.

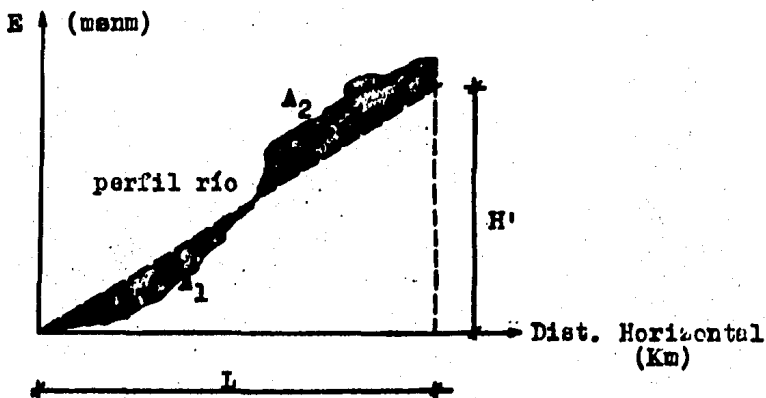
Por otra parte, las corrientes se dividen en:

- Efímeras: Son aquellas en las que el Escurrimiento se presenta sólo cuando llueve.
- Intermitentes: Son aquellas que llevan agua tiempo después de que llueve, y depende de las características geométricas del río.
- Perennes: Son aquellas que llevan agua todo el tiempo.

B.5) Pendiente del cauce principal

Existen varios criterios para la determinación de la pendiente de un cauce. Se explicará el Método de la Pendiente compensada.

Este método es gráfico, por lo que debemos dibujar en un plano de Elevación vs. Distancia horizontal, el cauce, y tantear hasta que las áreas se igualen.



Las Areas A₁ y A₂ deben ser iguales, y la pendiente del cauce principal será igual a:

$$S = \frac{H'}{L}$$

C. PRECIPITACION

La Estación climatológica es una instalación que nos permite medir el comportamiento de los fenómenos atmosféricos que componen el clima en un cierto lugar, en un cierto tiempo. Uno de los fenómenos es la Precipitación, que se define como el agua proveniente de la Atmósfera y que recibe la superficie terrestre, en cualquier estado físico.

La temperatura a punto de rocío, por otra parte, es aquella temperatura cuya disminución provocaría la condensación de las partículas de vapor y consecuentemente la precipitación.

C.1) Medición de la Precipitación.

La precipitación se mide con 2 aparatos, el Pluviómetro y el Pluviógrafo.

El Pluviómetro es un recipiente cilíndrico, que se coloca al aire libre, con una altura de 60 cm. y un diámetro de 20 cm., en cuyo centro y a lo largo de su longitud tiene una probeta graduada de sección 10 veces menor (diámetro 2 cm.) donde se lee la altura de lluvia que se presentó. El área de captación, es el círculo del pluviómetro, que tiene forma de embudo, y el objeto de que la probeta de medición sea 10 veces menor es que puede apreciarse hasta décimas de milímetro. Ejemplo: si se lee 100 mm., significa que la precipitación real fué 10.0 mm.

El Pluviógrafo, es un aparato más sofisticado, y muy similar al pluviómetro, ya que tiene las mismas componentes, sólo que algo adicional: un flotador dentro de la probeta conectado con un mecanismo de reloj y con papel.

El funcionamiento es simple, el flotador, a medida

que llueve, se mueve, y en su otro extremo tiene una plumilla apoyada en un papel que envuelve a un cilindro que tiene reloj, dando una vuelta cada 24 horas. Así, se obtiene un registro de la variación de la precipitación en un día, y se cambia el papel para el siguiente.

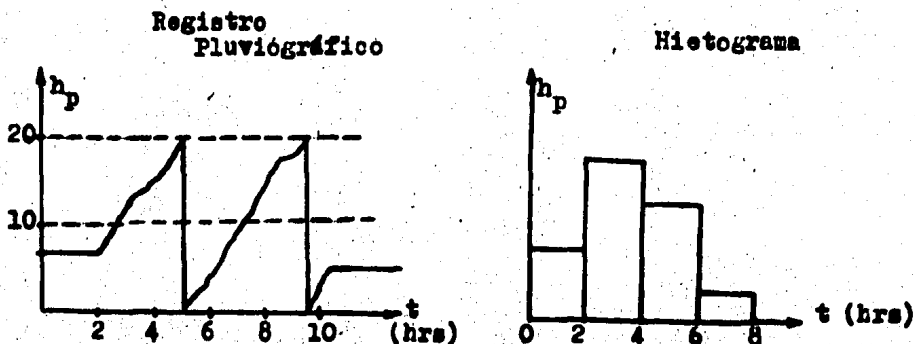
La ventaja de éste aparato, es que nos informa no sólo de cuánto llovió, sino también durante qué tiempo, y de ésta forma podemos saber la intensidad y la duración de una tormenta.

La intensidad de lluvia se define como la altura de precipitación entre la duración de la misma.

C.2) Hietograma

Hietograma es una gráfica que nos indica la altura de lluvia para diferentes intervalos de tiempo, ó bien la variación de las intensidades de lluvia en un cierto intervalo.

Los hietogramas se pueden construir únicamente contando con registros pluviográficos, ya que es necesario conocer exactamente la duración de la tormenta, para dividir ésta entre los intervalos de tiempo.

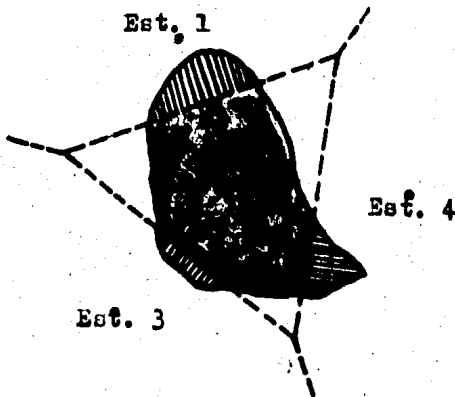


0.3) Lluvia media en la Cuenca.

Frecuentemente, existen un una sola cuenca varias estaciones climatológicas que miden la precipitación, y es necesario saber un valor medio de la misma, tomándose en cuenta para ello la situación que tienen dichas estaciones dentro de la cuenca.

Así, existe un Método llamado Polígonos de Thiessen que toma en cuenta las Areas de influencia de cada estación climatológica.

En la figura se aprecian las Areas de Influencia:



hp_i = Lluvia en la Estación 'i'
 A_i = Area en la Estación 'i'
 A_c = Area de la Cuenca.

$$hp_m = \frac{\sum hp_i A_i}{A_c}$$

El procedimiento es simple: se triangulan todas las estaciones que pudieran tener influencia en la cuenca, después se trazan mediatrices en cada lado de un triángulo y se obtiene la intersección de ellas en cada uno; después se unen éstos puntos de cada triángulo entre sí y se obtiene de ésta forma el área de influencia de cada estación.

$$\text{Lluvia media} = \frac{\text{Suma de (Lluvia}_i \cdot \text{Area}_i)}{\text{Area de la cuenca}}$$

La lluvia media en la cuenca se puede calcular por el procedimiento de Isoyetas, y cabe mencionar que es el más exacto.

Isoyeta es una línea que une puntos de igual precipitación. El plano debe corresponder precisamente a la tormenta, y el problema consiste en que casi nunca se cuenta en una cuenca con el suficiente número de estaciones climatológicas para trazar el plano de Isoyetas, las cuáles deben dibujarse como si fueran curvas de nivel.

La lluvia media calculada por Isoyetas es igual a la Sumatoria del producto del Area comprendida entre dos Isoyetas por la lluvia media entre éstas, y dividir ésta Sumatoria entre el Area total de la Cuenca.

C.4) Hietograma medio en la Cuenca

Se diferencia del hietograma del pluviógrafo en que la precipitación en cada intervalo debe multiplicarse por un factor de ajuste.

El factor de ajuste es igual a la lluvia media en la cuenca, entre la precipitación máxima acumulada en el pluviógrafo.

C.5) Curvas hp.A.d

Las curvas altura de lluvia-Area-duración nos indican la altura de lluvia para cada área de la cuenca dependiendo de su duración. Diferentes problemas hidrológicos requieren un análisis de la distribución temporal y espacial de la precipitación en una tormenta. Básicamente, el análisis de las curvas hp-A-d se realiza para determinar las cantidades máximas de precipitación que caen dentro de diferentes duraciones y sobre áreas de diferentes tamaños.

Los datos que se requieren son el Plano de la cuenca, el plano de Isoyetas y Pluviógrafo.

El procedimiento para la construcción de las curvas es el siguiente:

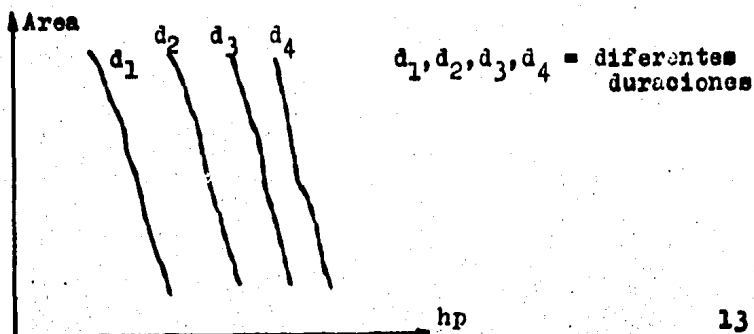
-Se secciona la cuenca tomando como límites el par-teguas y la Isoyeta.

-El cálculo debe hacerse de la Isoyeta mayor a la menor.

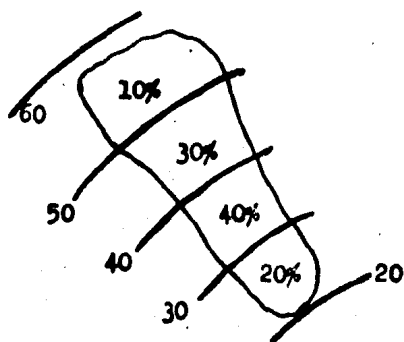
-Se calcula por el criterio de Isoyetas, la lluvia media en cada área.

-A partir de los pluviógrafos se determina la curva masa ajustada en cada área.

-Se obtiene la lluvia máxima para cada duración, y se grafica.



Ejemplo.- Sea una cuenca de 200 Km^2 con un pluviógrafo representativo de una tormenta con $d=24$ horas, y que cada 6 horas la altura de lluvia acumulada fué de 10,25,35 y 40 mm. Obtener las curvas hp -A-d. Se tiene el plano de Isoyetas de la tormenta.



$$hp_m = 38 \text{ mm} \quad (\text{Isoyetas})$$

Obtención de la lluvia media en cada área.

Isoyeta	Area acumul.	hp entre Isoyetas	Vol(hp)	Vol(hp) acumul.	hp _m
50	20	55	1100	1100	55.0
40	80	45	2700	3800	47.5
30	160	35	2800	6600	41.3
20	200	25	1000	7600	38.0

Cálculo de las curvas hp -A-d.

Iso- yeta	Area acum	hpm		Duraciones			
				6	12	18	24
50	20	55	Pluviógrafo	10.0	25.0	35.0	40.0
			cma $f=55/40$	13.8	34.4	48.1	55.0
			Inc. ajustado	13.8	20.6	13.7	6.9
			hp máx.	20.6	34.4	48.1	55.0
40	80	47.5	Pluviógrafo	10.0	25.0	35.0	40.0
			cma $f=47.5/40$	11.9	29.7	41.5	47.5
			Inc. ajustado	11.9	17.8	11.9	5.9
			hp máx.	17.8	29.7	41.6	47.5

30	160	41.3	Pluviógrafo	10.0	25.0	35.0	40.0
			cma $f=41.3/40$	10.3	25.8	36.1	41.3
			Inc. ajustado	10.3	15.5	10.3	5.2
			hp. máx	15.5	25.8	36.1	41.3
20	200	38	Pluviógrafo	10.0	25.0	35.0	40.0
			cma $f=38/40$	9.5	23.8	33.3	38.0
			Inc. ajustado	9.5	14.3	9.5	4.7
			hp. máx	14.3	23.8	33.3	38.0

siendo:

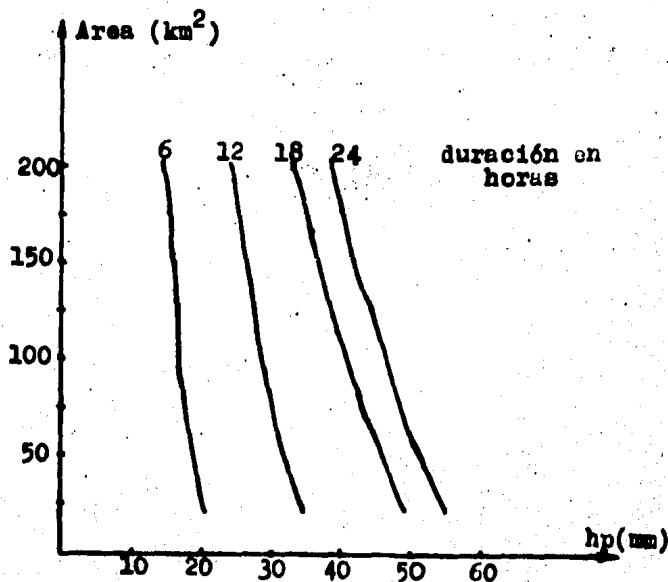
cma = curva masa ajustada

f = factor de ajuste

Inc = Incremento

hp. max. = Lluvia máxima para cada duración

Construcción de las curvas hp-A-d. Se grafican los valores de Lluvia máxima para cada duración.



C.6) Curvas i-d-T

Estas curvas intensidad-duración período de Retorno nos permiten conocer la intensidad de lluvia probable dada una duración y un período de Retorno que nos es desconocida, a partir de la construcción de las curvas con datos conocidos.

Se entiende como período de Retorno (T) al intervalo promedio de tiempo dentro del cuál un evento de magnitud "y" puede ser igualado ó excedido por lo menos una vez en promedio.

$$\text{Asimismo } P(Y \geq y) = \frac{1}{T}$$

siendo Y = evento que pudiera suceder. Aleatorio.
Puede ser Lluvia ó Gasto.

Estas curvas, no son otra cosa que una correlación múltiple donde se involucran las variables intensidad, duración de lluvia y período de Retorno.

La forma de la ecuación es: $i = \frac{k \cdot T^h}{d^n}$

siendo k, h, n los parámetros que definen la curva.

Para la obtención de las curvas, se necesita conocer la mayor cantidad de curvas masa del pluviógrafo representativo en la cuenca, para que se tenga el mayor número de períodos de Retorno. El número de tormentas debe ser igual al número de años de que se tenga registro, y se escogen las más grandes siempre.

El período de retorno se obtiene por criterio de excedentes anuales, dónde

$$T = \frac{n}{m}$$

n= número de datos del registro
m= número de orden del dato (Dentro del registro, ordenado de mayor a menor)

Una vez que se tienen los datos, se obtienen diferentes intensidades para cada período de tiempo seleccionado en la curva masa, asimismo, se ordenan las tormentas de mayor a menor y se calcula su período de retorno.

La ecuación de correlación múltiple:
$$i = \frac{k T^h}{d^n}$$

se puede transformar en:

$$\log i = \log k + h \log T - n \log d$$

realizando cambio de variables para simplificar los términos se tiene que:

$$\begin{aligned} y &= \log i \\ a_0 &= \log k \\ a_1 &= h \\ a_2 &= -n \\ x_1 &= \log T \\ x_2 &= \log d \end{aligned}$$

Después del cambio de variables la ecuación queda de la forma siguiente:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2$$

y se establecen las siguientes ecuaciones:

$$1y = a_0 n + a_1 i x_1 + a_2 i x_2 \dots\dots\dots (1)$$

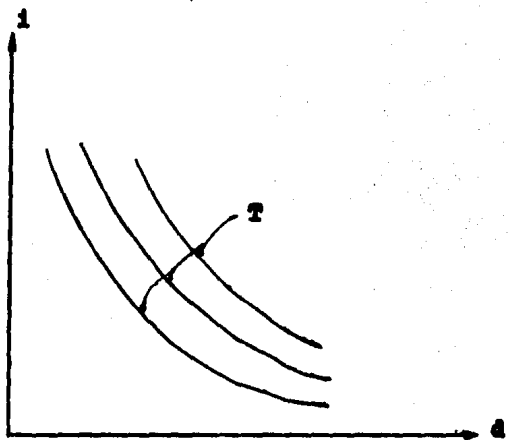
$$i x_1 y = a_0 i x_1 + a_1 i x_1^2 + a_2 i x_1 x_2 \dots\dots\dots (2)$$

$$i x_2 y = a_0 i x_2 + a_1 i x_1 x_2 + a_2 i x_2^2 \dots\dots\dots (3)$$

Después de esto, el problema es conocer a_0 , a_1 , y a_2 .

Las ecuaciones 1,2,3 se establecen con el fin de tener un sistema de 3 ecuaciones para conocer las 3 incógnitas.

La configuración de las curvas $i-d-f$ es como sigue:



D. ESCURRIMIENTO E INFILTRACION

El Escurrimiento es la parte de la precipitación drenada por las corrientes de las cuencas hasta su salida.

La otra parte de la precipitación es la Infiltración, proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático.

Es decir, el agua infiltrada más la que escurre son iguales a la precipitación.

$$h_p = h_e + h_f$$

El Escurrimiento se divide en Superficial, Sub-superficial (Rápido y Lento) y Subterráneo.

El Escurrimiento directo está formado por el escurrimiento superficial y el sub-superficial rápido, en tanto que el Escurrimiento base está formado por el sub-superficial lento y el subterráneo.

Por otra parte, el agua no siempre escurre por los cauces, sino también por el suelo, antes de llegar a ellos; a ésta etapa se le conoce como Flujo por tierra.

El proceso del escurrimiento es como sigue: el agua, al llegar al suelo, primeramente se infiltra debido a las condiciones de humedad del mismo. Una vez que el suelo no puede absorber más agua, ésta escurre formando el llamado escurrimiento directo.

D.1) Capacidad de infiltración

Es la máxima cantidad de agua que un suelo puede absorber.

Si la intensidad de lluvia es superior a ésta capacidad de infiltración, entonces existirá escurrimiento superficial.

D.2) Índice de Infiltración

Es la forma de medir la capacidad de infiltración, y tiene unidades de longitud entre tiempo, es decir, la altura de lluvia que absorbe el suelo por unidad de tiempo.

Este parámetro es un promedio, ya que al principio de la tormenta el suelo absorberá mayor cantidad de agua y al final de la misma, menos agua. Así, éste índice de infiltración se toma ó nos indica el promedio de agua absorbida por el suelo en un cierto lapso.

D.3) Curva de capacidad de infiltración media.

Se usa cuando se tienen tormentas consecutivas, sólo se explicará superficialmente el procedimiento, ya que por lo general tiende al valor del índice de infiltración.

-Se calcula la 'hp' de cada tormenta y se obtiene la 'he' en cada una de ellas (ya que se tiene el volumen de escurrimiento y puede dividirse entre el área de la cuenca)

-Se obtiene la 'hf' y posteriormente la capacidad de infiltración como 'hf'/t siendo 't' el tiempo que dura la infiltración.

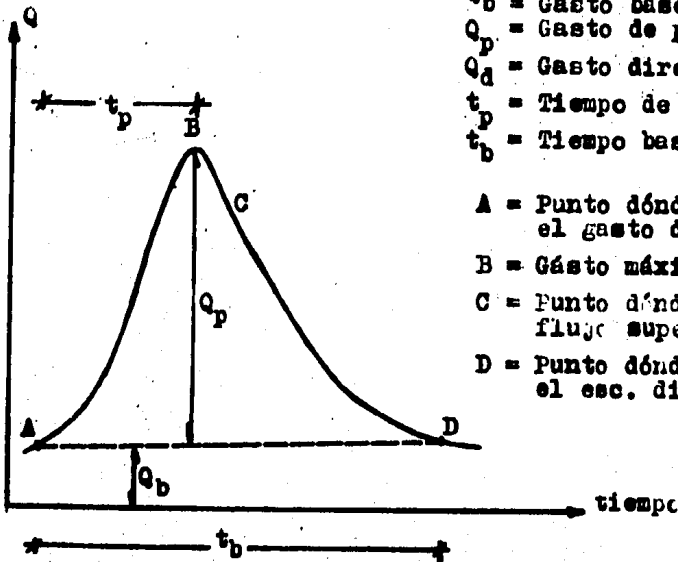
Este valor según Horner y Lloyd es igual a la duración en exceso más un tercio del tiempo que transcurre entre el pico (punto en que se presenta el gasto máximo) y el punto en que termina el flujo superficial.

Por otra parte, la duración en exceso se conoce aplicando el índice de infiltración a cada histograma de las tormentas.

Finalmente, en el punto medio de duración en exceso de cada tormenta, se coloca el valor de la capacidad de infiltración correspondiente y se unen los puntos, con lo que se forma la curva de capacidad de infiltración media.

D.4) Hidrograma

Es la representación gráfica del flujo de una corriente ordenado en forma cronológica. Sus partes se indican en la figura siguiente:



Q_t = Gasto total.

$Q_t = Q_b + Q_d$

$Q_{m\acute{a}x} = Q_b + Q_p$

Q_b = Gasto base.

Q_p = Gasto de pico.

Q_d = Gasto directo.

t_p = Tiempo de pico.

t_b = Tiempo base.

A = Punto dónde se inicia el gasto directo.

B = Gásto máximo.

C = Punto dónde cesa el flujo superficial.

D = Punto dónde termina el esc. directo.

El volumen de escurrimiento (V_e) es el área bajo la curva del hidrograma.

$$\text{Area bajo la curva} = V_e = \int Q \, dt$$

Si trabajamos con intervalos de tiempo constantes, el volumen de escurrimiento será igual a:

$$V_e = at \sum Q_d$$

Por otra parte, tenemos que $V_e = h_e A_c$

dónde h_e = Altura de lluvia de escurrimiento.
 A_c = Área de la Cuenca.

D.5) Análisis de Hidrogramas.

El Análisis de un hidrograma consiste en determinar cuáles son los gastos directos y cuáles los gastos base.

D.5.1) Tormenta aislada.

Un criterio para obtener los gastos directos y base, es la deducción de la curva de vaciado del escurrimiento base, ésta es el tramo descendente del hidrograma después del punto 'D'.

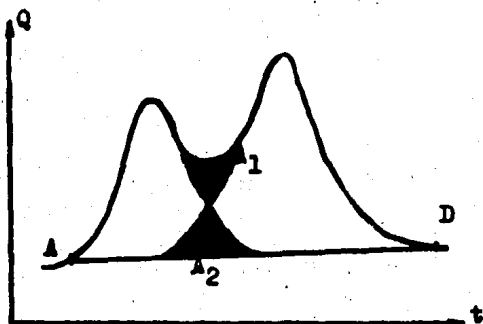
Una vez que se consigan el mayor número de hidrogramas de la cuenca a la misma escala, se supone la primera curva de vaciado, la superponemos con el segundo hidrograma, y tomamos la que quede abajo, y así sucesivamente con todas las curvas de los hidrogramas que tengamos. El punto 'D' será el que separa la curva de vaciado de la cuenca con el del hidrograma en estudio.

D.5.2) Tormentas Consecutivas.

Tormentas consecutivas son aquellas que ocurren sucesivamente, sin dejar que el río recupere su nivel original antes de la primera tormenta.

Para su Análisis, un método sencillo es el de Volúmenes. Se dibujan los hidrogramas de las tormentas como si fueran aisladas, suponiendo que el nivel del agua en el río sube y baja de la misma forma en ambas tormentas. Se obtiene el valor del Área 1 directamente de la gráfica.

Posteriormente se tantean rectas que unan a los puntos A y D hasta que el Área A_2 sea igual al área A_1 , según se observa en la gráfica:



D.6) Aforo de corrientes.

Los métodos para aforar corrientes pueden ser muy variados. Entre ellos se tiene la Sección de Control, el Método de Sección-Velocidad, y el Método de Sección-Pendiente.

D.6.1) Sección de Control.

Una sección de Control es aquella dónde se conoce la relación tirante-gasto. Pueden ser vertederos, compuertas, sección crítica, etc., se usa para corrientes pequeñas y es el más exacto de los métodos descritos.

D.6.2) Método de Sección-Velocidad.

Se basa en la ecuación $Q = AV$ y es usada en casi todas las estaciones hidrométricas.

Para determinar el tirante en el río se dispone de limnómetro ó limnógrafo, ambos referenciados a un banco de nivel. El primero es manual, mientras que el limnógrafo es automático, y con un flotador y una plumilla indica sobre un papel, el nivel del río en el transcurso del tiempo.

Para medir la velocidad, se usa un molinete, midiendo a 0.6 veces el tirante en sentido vertical, en sentido horizontal se toman 'n' velocidades en 'n' áreas.

$$\text{El Gasto será igual a: } Q = A_i V_i \\ \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

D.6.3) Método de Sección Pendiente.

Este método se aplica sólo cuando no hay estaciones hidrométricas.

Se escogen 2 secciones en extremos de una corta longitud, y el gasto será igual a:

$$Q = \frac{A}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

$$\text{siendo } R_h = \text{Radio hidráulico medio} = \frac{R_{h1} + R_{h2}}{2}$$

$$A = \text{Area media de la sección}$$

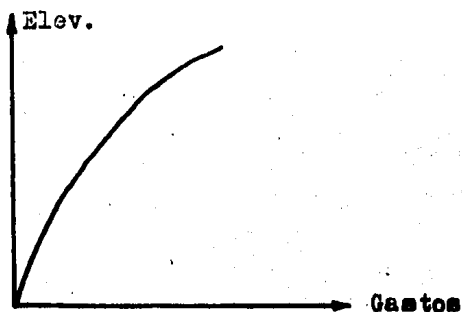
$$A = (A_1 + A_2) / 2$$

S = Pendiente entre las secciones 1, 2 se considera constante e igual a la diferencia de elevaciones de ambas secciones, entre la longitud existente entre ellas. Cabe señalar que hay un banco de nivel común para ambas secciones.

D.7) Curva Elevaciones-Gastos.

Sirve para conocer los gastos conociendo únicamente el nivel del río.

Esta curva debe verificarse cada cierto tiempo tomando velocidades y áreas durante 4 días y en caso de no coincidir los gastos, debemos construir otra curva.



Si un punto E_n queda fuera de la curva (no nos alcanza) podemos obtener su ecuación y extrapolar.

III - DETERMINACION DE LA AVENIDA DE DISEÑO.

III.A) Control Climatológico e Hidrométrico Simultáneo.

La situación más favorable para calcular una Avenida es cuando se dispone de pluviógrafo(s) y Estación Hidrométrica en la cuenca, ya que podemos hacer uso del procedimiento del Hidrograma Unitario.

Procedimiento del Hidrograma Unitario.

Hidrograma Unitario es el hidrograma de escurrimiento directo provocado por una lluvia en exceso igual a un centímetro distribuida uniformemente en toda el área de la cuenca y en toda la duración en exceso.

Para la obtención de hidrogramas unitarios, se deberá seleccionar avenidas aisladas, de preferencia las que han originado los gastos máximos anuales. Deberán obtenerse los registros pluviográficos correspondientes a esas avenidas aisladas, para poder conocer la relación lluvia-escurrimiento.

Una vez que se cuenta con el hidrograma y el hietograma de un evento en particular, se procede como sigue:

- Del hidrograma, se separa el escurrimiento base y el directo.
- Se calcula el volumen de escurrimiento directo con la expresión:

$$V_e = I Q_d \Delta t$$

siendo Δt = intervalo de tiempo.

Q_d = Gastos directos.

V_e = Volumen de escurrimiento.

- Se determina la lluvia en exceso.

$$h_e = \frac{V_e}{A_c}$$

siendo h_e = Lluvia en exceso

V_e = Volumen de escurrimiento directo

A_c = Area de la cuenca

- Del Histograma, y con la lluvia en exceso, se determina el índice de infiltración y posteriormente la duración en exceso de la tormenta.

- Si la lluvia en exceso es constante en toda la duración en exceso, se valúan las ordenadas del hidrograma unitario. Para fines prácticos, se acepta la lluvia en exceso como constante en toda la duración en exceso si la diferencia entre barras seguidas en el histograma es igual ó menor al 30% con respecto a la mayor.

$$q = \frac{Q_d}{h_e} \quad \text{para cada valor de 'Qd'}$$

siendo q = gasto directo unitario

Q_d = gasto directo

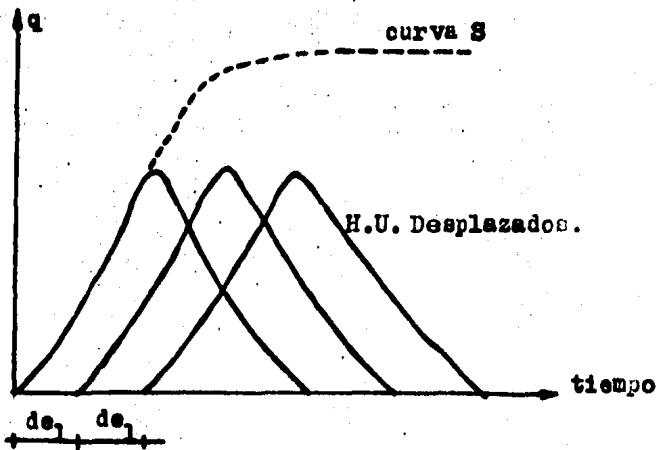
h_e = lluvia en exceso

El procedimiento del Hidrograma Unitario es el más exacto, y nos proporciona directamente el hidrograma de gastos directos de la Avenida de Diseño, con sus tiempos y gasto de pico, sin embargo, tiene sus inconvenientes, y por ello se utilizan también procedimientos auxiliares como los que se explican a continuación.

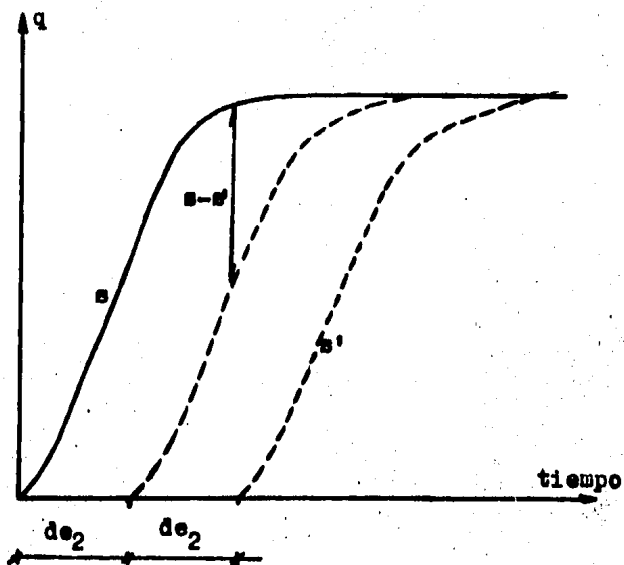
Procedimiento de la Curva 'S'.

Quando tenemos un hidrograma unitario asociado a una duración en exceso ' de_1 ' y se presenta una tormenta con una duración en exceso diferente ' de_2 ' entonces el hidrograma unitario se obtiene utilizando el procedimiento de la curva 'S', el cuál se explica a continuación:

- Se desplaza el hidrograma unitario conocido varias veces, una distancia igual a la duración original de_1 .
- Se suman las ordenadas de los diferentes hidrogramas desplazados y con ello se forma la curva S.



- Se desplaza la curva S una distancia igual a la duración de_2 de la nueva tormenta.
- Se restan las ordenadas de la curva S que desplazamos.
- Las ordenadas del nuevo hidrograma unitario se obtienen multiplicando la diferencia de ordenadas de la curva S desplazada por la relación de_1/de_2 .



El desplazamiento de la curva S se hace como se indica, y el hidrograma unitario nuevo se obtiene con la expresión:

$$q' = (s - s') \frac{de}{de'}$$

siendo

- s' = curva S desplazada
- de' = duración de la nueva tormenta.
- q' = ordenadas del nuevo hidrograma unitario.

Los gastos directos de la Avenida de Diseño serán:

$$Qd = q'he'$$

he' = nueva altura de precipitación en exceso ó de escurrimiento.

Procedimiento del Hidrograma Unitario Instantáneo.

Cuando tenemos una tormenta con una intensidad variable, es decir, cuando en el hietograma la diferencia de altura de lluvia es mayor del 30% una con respecto a la inmediata, se aplica la teoría del Hidrograma Unitario Instantáneo.

Se basa en que para intensidades variables de una tormenta, el hidrograma de gastos directos puede construirse con una serie de hidrogramas superpuestos, siendo cada uno de ellos el resultado de un solo incremento de lluvia en exceso de duración unitaria. De ésta forma, contando con un hidrograma unitario para un intervalo de tiempo elegido, el hidrograma total de una tormenta se calcula sumando todos los hidrogramas que produciría cada altura de lluvia en el hietograma, considerando a éstas como tormentas aisladas.

Los datos con que deben contarse son el hidrograma unitario, y el hietograma producido por la nueva tormenta, cuyo hidrograma total desea calcularse.

El valor de los gastos directos está dado por la siguiente expresión:

$$Qd_i = \sum_{k=1}^i q_k h_{e_{i-k+1}} \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, n$$

siendo

Qd_i = Gasto de escurrimiento directo para el i -ésimo intervalo de tiempo.

n = Número de ordenadas del hidrograma de escurrimiento directo.

El valor de 'n' está dado por:

$$n = q_n + h a_n - 1$$

Esta expresión nos dá como resultado la combinación de los gastos del hidrograma unitario por todas y cada una de las alturas de precipitación en exceso. Es decir, aplicamos la teoría del Hidrograma Unitario Instantáneo, de considerar a cada altura de lluvia en exceso como tormenta aislada.

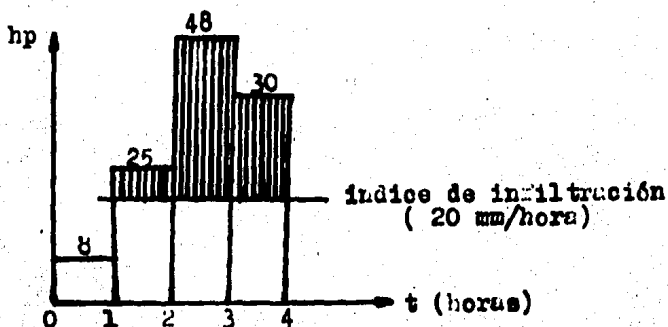
Ejemplo.- Durante una tormenta con una duración de lluvia efectiva de una hora, se determinó que la altura de la misma fué de 38 mm. originando el siguiente hidrograma: (tiempo en horas).

t	Q(m ³ /seg)	
1	2.8	Determinar con ésta información el que produciría una tormenta cuya distribución en la cuenca en estudio originó en sus cuatro horas de duración las siguientes variaciones horarias: 8, 25, 48 y 30 mm.
2	2.7	
3	6.2	
4	14.5	
5	17.5	
6	16.6	
7	13.0	
8	9.3	Considérese un índice de infiltración de 20 mm/hora.
9	5.9	
10	5.1	
11	2.9	
12	2.4	
13	1.7	

La Solución es primeramente obtener el Hidrograma Unitario.

t(h)	Q(m ³ /seg)	Q _b	Q _d	q(m ³ /s/cm)
1	2.8	2.8	0	0
2	2.7	2.7	0	0
3	6.2	2.7	3.5	0.92
4	14.5	2.6	11.9	3.13
5	17.5	2.6	14.9	3.92
6	16.6	2.6	14.0	3.38
7	13.0	2.5	10.5	2.76
8	9.3	2.5	6.8	1.79
9	5.9	2.5	3.4	0.89
10	5.1	2.4	2.7	0.71
11	2.9	2.4	0.5	0.13
12	2.4	2.4	0	0
13	1.7	1.7	0	0

El Hidrograma Unitario obtenido está asociado a una duración en exceso de 1 hora. El histograma de la nueva tormenta es el siguiente:



Como la diferencia entre las alturas de lluvia en exceso es mayor a 30%, esto es, que la duración de lluvia en exceso no es constante, entonces se aplica el Hidrograma Unitario Instantáneo.

q	$q \cdot h e_1$	$q h e_2$	$q h e_3$	Q_d
0	0			0
0.92	0.46	0		0.46
3.13	1.57	2.58	0	4.15
3.92	1.96	8.76	0.92	11.64
3.38	1.69	10.98	3.13	15.80
2.76	1.38	9.46	3.92	14.76
1.79	0.90	7.73	3.38	12.01
0.89	0.45	5.01	2.76	8.22
0.71	0.35	2.49	1.79	4.64
0.13	0.07	1.09	0.89	2.94
0	0	0.36	0.71	1.07
		0	0.13	0.13
			0	0

De ésta forma, se ha obtenido el Hidrograma de Esgurrimiento Directo para la nueva tormenta, que sumado al Gasto Base, nos proporciona el Hidrograma Total de Esgurrimiento.

III.B) Control Climatológico y Características Fisiográficas.

En un gran número de cuencas ocurre que se tienen pluviógrafos y pluviómetros para medir la precipitación que en ellas ocurre, pero que no se cuenta con estaciones hidrométricas que nos hagan conocer el escurrimiento que producen.

De ésta forma, tienen que hacerse modelos lluvia-escurrimiento que nos permitan conocer éste último a partir del registro de las lluvias.

III.B.1) Procedimiento de la Precipitación Máxima Probable.

Este método establece la determinación de una precipitación máxima probable que pudiera ocurrir en una cuenca, y a partir de ésta tormenta, se deduce el hidrograma de la Avenida de Diseño, considerando las características de la cuenca, como son tipo de suelo, etc.

Para calcular la precipitación máxima probable, se considera que las precipitaciones extremas registradas en el pasado, son representativas de la ocurrencia de mecanismos muy eficientes de formación de tormentas, y que si no alcanzaron el rigor de la precipitación máxima posible fué porque la humedad disponible no era la máxima.

Estas tormentas extremas son fenómenos poco frecuentes, por lo que puede suceder que muy pocas ó ninguna se haya presentado en la cuenca en estudio. Sin embargo, tormentas extremas que ocurrieron fuera de la cuenca pudieron presentarse en la cuenca en estudio de suscitarse algunos cambios meteorológicos factibles. Por éstas razones, es necesario incrementar la secuencia histórica de tormentas ocurridas en la cuenca mediante la transposición de otras desde la zona en que ocurrieron hasta el sitio de interés.

La precipitación máxima probable se calcula según el siguiente procedimiento:

a) Análisis de tormentas ocurridas en la cuenca.

Se analiza la información de grandes tormentas ocurridas en la cuenca (pueden tomarse las 10 mayores) a fin de determinar las características típicas de la precipitación que se puede presentar en la zona, escogiendo duraciones críticas.

Esta selección se realiza considerando fundamentalmente el área de la cuenca y el volumen de la presa destinado a regular la Avenida. En cuanto a la influencia del tamaño de la cuenca, ésta puede tomarse en cuenta seleccionando las 3 ó 4 avenidas históricas más importantes, y analizando los registros pluviográficos de las fechas correspondientes, de ésta manera se tendrá una idea aproximada del tiempo de respuesta de la cuenca y la duración mínima de una tormenta que le afecte sensiblemente.

La capacidad de regulación de una obra se toma en cuenta comparando el volumen de la mayor avenida histórica con el volumen destinado a regular avenidas en la presa; si la relación entre éstos volúmenes es pequeña (menor que 0.3) la duración total de la tormenta que se utilice para el diseño deberá escogerse mayor que la correspondiente a la máxima avenida histórica. Si aún suponiendo tormentas con 3 días de duración total, la capacidad de regulación de la presa sigue siendo muy importante en términos relativos, será necesario utilizar una secuencia de tormentas para el diseño.

Asimismo, para cada tormenta de las 10 más grandes, deberá presentarse un resumen que incluya Cartas de Iso-baras (para indicar el tipo de fenómeno predominante), Registros de temperaturas de punto de Rocío y trayectorias generales del flujo y velocidades del viento, mapas de Isocetas, curvas hp-A-d.

b) Análisis de grandes tormentas ocurridas en otros sitios.

Se realiza mediante la recopilación de información de tormentas ocurridas en otros sitios y sirve para reconocer el tipo de tormentas y decidir si es posible ó no incluirlas, mediante algunos mecanismos de transformación, como tormentas registradas en la cuenca en estudio. Esta recopilación incluye localización de la zona con reconocimiento topográfico, identificación de fenómenos meteorológicos, temperaturas de punto de rocío y curvas hp-A-d.

c) Transposición.

Debido a la poca frecuencia con que aparecen las tormentas extremas, es necesario incrementar la muestra de éste tipo de fenómenos mediante la información registrada en otras zonas, lo cual se realiza llevando al sitio en estudio, las tormentas registradas en otra zona mediante ajustes de humedad.

El procedimiento de transposición involucra el análisis meteorológico de la tormenta a ser traspuesta, la determinación de los límites de transponibilidad y la aplicación de ajustes para hacer las modificaciones por el cambio de lugar de la tormenta.

Para determinar los límites de transponibilidad, es necesario determinar claramente dónde y cuándo ocurrió la precipitación más fuerte y causas aproximadas en términos de meteorología sinóptica, delinear la región en la cuál la tormenta identificada es común e importante como productora de precipitación, además definir las limitaciones topográficas.

Por lo que se refiere a ajustes de humedad, éste se determina calculando el cociente entre el agua precipitable en el lugar de origen de la tormenta y la que se tiene en la cuenca estudiada. Si el proceso no lo es de transposición, se puede suponer que la temperatura de punto de rocío no cambia.

El factor de ajuste es:

$$K = \frac{h_o}{h_A}$$

siendo h_o = Agua precipitable en el punto de ocurrencia de la tormenta, para la temperatura de punto de rocío observada.

h_A = Agua precipitable en la cuenca que se estudia, para el mismo punto de rocío.

El agua precipitable puede calcularse a partir de la distribución de la humedad específica en una vertical.

Si ésta distribución no se conoce, se recurre a suponer que la atmósfera está saturada y que, por tanto, el agua precipitable depende solamente de la temperatura a punto de rocío superficial y de la altitud del terreno y se puede calcular mediante el uso de un cuadro (III.1) el cuál relaciona el agua precipitable entre dos niveles cualquiera en términos de la temperatura de rocío a nivel del mar. De la misma forma, el cuadro (III.2) permite referir la temperatura de rocío en cualquier nivel, al valor correspondiente al nivel del mar.

d) Maximización.

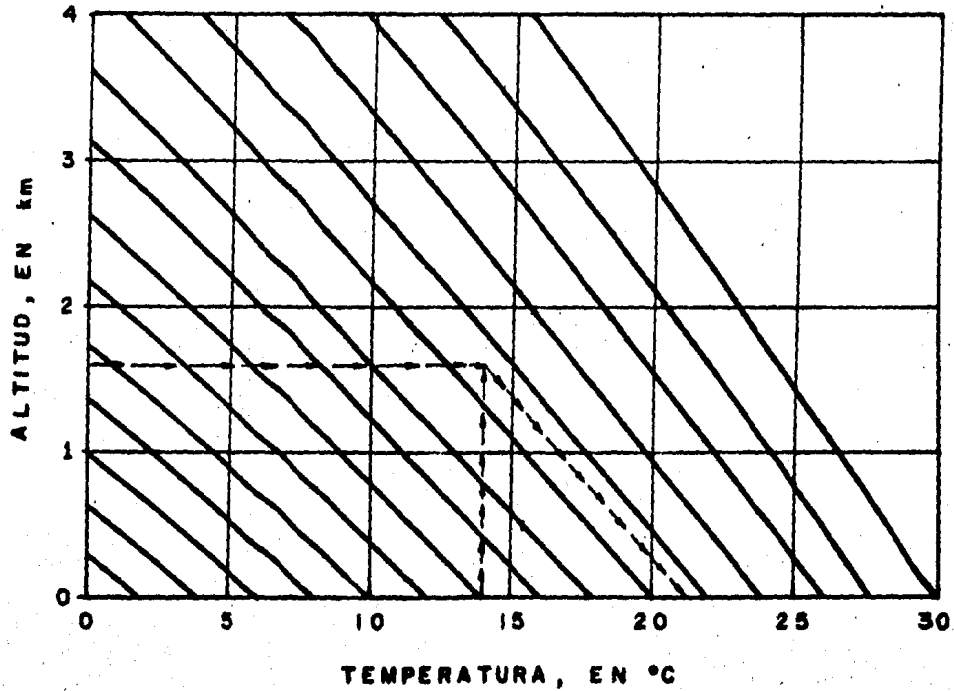
Consiste en multiplicar la precipitación observada por un coeficiente de maximización.

ALTITUD (M)	Temperatura de Rocío a 1000 mb, en °C						
	0	5	10	15	20	25	30
200	1	1	2	2	3	4	6
400	2	3	4	5	6	9	12
600	3	4	5	7	10	13	17
800	3	5	7	9	13	17	22
1000	4	6	8	11	15	21	23
1400	5	7	10	15	20	28	37
1800	6	9	12	18	25	34	46
2000	6	10	13	19	27	37	50
2400	7	10	15	22	31	43	57
2800	7	11	16	24	34	48	65
3000	8	11	17	25	35	50	68
3400	8	12	18	26	38	54	74
3800	8	12	19	28	41	58	80
4000	8	12	19	28	42	60	83
5000	8	13	20	31	46	67	94
6000	8	13	21	32	49	72	103
7000	8	14	21	33	51	76	110
8000	8	14	21	33	52	78	115
9000	8	14	21	33	52	80	118
10000		14	21	33	52	80	121
11000			21	33	52	81	122
12000				33	52	81	123
13000					52	81	124
14000					52	81	124
15000						81	124

CUADRO III.1 - Agua precipitable (mm) entre la superficie de 1000 mb y la altura indicada, como función del punto de rocío (°C) a 1000 mb.

cuadro III.2

DIAGRAMA PARA AJUSTAR LOS VALORES DE TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCIO, REFIRIENDOLOS AL NIVEL DEL MAR



Este coeficiente es igual a: $K_m = \frac{hm}{ho}$

siendo

hm = agua precipitable calculada con el valor de la temperatura de rocío persistente máxima en la historia de la zona.

ho = Agua precipitable calculada con el valor de la temperatura de rocío persistente observada durante la tormenta.

La temperatura de rocío persistente para una duración dada se define como el máximo valor de temperatura de rocío que es igualado ó excedido durante cualquier lapso continuo de la misma duración.

e) Ajuste de las curvas $hp-A-d$ y selección de la máxima.

Los valores de los coeficientes de transposición K y maximización K_m , asociados a cada tormenta, se utilizan para ajustar las curvas $hp-A-d$, multiplicando las alturas de precipitación correspondientes a cada área y cada duración por el producto de ambos factores (En caso de tormentas registradas en el sitio, el factor 'K' es igual a uno).

Una vez ajustadas las curvas, se selecciona la más desfavorable, tomando en cuenta la duración escogida en el primer paso (a) como duración crítica.

f) Determinación de los Hietogramas.

Una vez seleccionadas las tormentas más desfavorables, se construyen los hietogramas correspondientes, cumpliendo con la restricción de las curvas $hp-A-d$.

La construcción de los histogramas se hace con el histograma adimensional de la tormenta correspondiente, dividiendo cada altura de lluvia de cada intervalo de tiempo (barra del histograma) entre la suma total de las barras. De ésta forma, se tiene la distribución porcentual de la lluvia para cada intervalo de tiempo.

g) Relación lluvia-escorrimento.

Definida la tormenta de diseño, debemos conocer la relación lluvia escurrimiento necesaria para deducir la Avenida de Diseño, ya que la cuenca no tiene estación hidrométrica.

Para tomar en cuenta el efecto de los factores que afecten directamente a la cantidad de lluvia en exceso en cuencas naturales (tales como uso de suelo, condición de la superficie, tipo de suelo y duración de lluvia) se tiene el número de escurrimiento 'N' el cuál está en función de éstos factores.

Los suelos según afecten las características del material que los forma, al escurrimiento, en 4 tipos de suelos hidrológicos: A,B,C y D.

Suelo 'A'. Arenas profundas con poco limo y arcilla, loess muy permeables, gravas y arenas de tamaño medio, limpias y mezcla de ambas. Escurrimiento mínimo.

Suelo 'B'. Arenas finas, limos orgánicos e inorgánicos, mezclas de arena y limo.

Suelo 'C'. Comprende Arenas muy finas, arcillas de baja plasticidad, mezclas de arena, limo y arcilla.

Suelo 'D'. Es el que presenta el escurrimiento máximo, y está constituido por arcillas de alta plasticidad, suelos poco profundo con subhorizontes casi impermeables cerca de la superficie.

En el cuadro III.3 se considera, además, el uso del suelo, para conocer el valor de 'N'. Así, puede valuarse la lluvia en exceso para cualquier valor de la precipitación con la expresión siguiente:

$$h_e = \frac{(h_p - (508/N) + 5.08)^2}{h_p + (2032/N) - 20.32}$$

siendo h_e = Lluvia en exceso en centímetros.

h_p = Lluvia total en centímetros.

h) Determinación de la Avenida de Diseño.

La Avenida de Diseño se obtiene con el Hidrograma Triangular, ya que no se tiene ninguna información sobre la forma de los hidrogramas que se producen en el río.

Sus elementos son:

Gasto de pico $Q_p = 0.278 \frac{h_e(A)}{t_p}$
(en m^3/seg)

h_e = Lluvia en exceso en mm.

A = Area en Km^2 .

t_p = tiempo de pico en hrs.

tiempo base $t_b = 2.78 t_p$
(en horas)

cuadro III.3

SELECCION DEL NUMERO DE ESCURRIMIENTO N

USO DEL SUELO O COBERTURA	CONDICION DE LA SUPERFICIE	TIPO DE SUELO			
		A	B	C	D
Bosques (sembrados y cultivados)	Ralo, baja transpiración	45	66	77	83
	Normal, transpiración media	36	60	73	79
	Espero o alta transpiración	25	55	70	77
Caminos	De tierra	72	82	87	89
	Superficie dura	74	84	90	92
Bosques naturales	Muy ralo o baja transpiración	56	75	86	91
	Ralo, baja transpiración	46	68	78	84
	Normal, transpiración media	36	60	70	76
	Espero, alta transpiración	26	52	62	69
	Muy espero, alta transpiración	15	44	54	61
Descanso (sin cultivo)	Surcos rectos	77	86	91	94
Cultivos de surco	Surcos rectos	70	80	87	90
	Surcos en curvas de nivel	67	77	83	87
	Terrazas	64	73	79	82
Cereales	Surcos rectos	64	76	84	88
	Surcos en curvas de nivel	62	74	82	85
	Terrazas	60	71	79	82
Leguminosas (sembradas con maquinaria o al vo leo) o potrero de rota ción	Surcos rectos	62	75	83	87
	Surcos en curvas de nivel	60	72	81	84
	Terrazas	57	70	78	82
Pastizal	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	84
	Bueno	39	61	74	80
	Curvas de nivel, pobre	47	67	81	88
	Curvas de nivel, normal	25	59	75	83
	Curvas de nivel, bueno	6	35	70	79
Potrero (permanente)	Normal	30	58	71	78
Superficie impermeable		100	100	100	100

tiempo de pico
(en horas)

$$t_p = 0.00505 (L/S^{0.5})^{0.64}$$

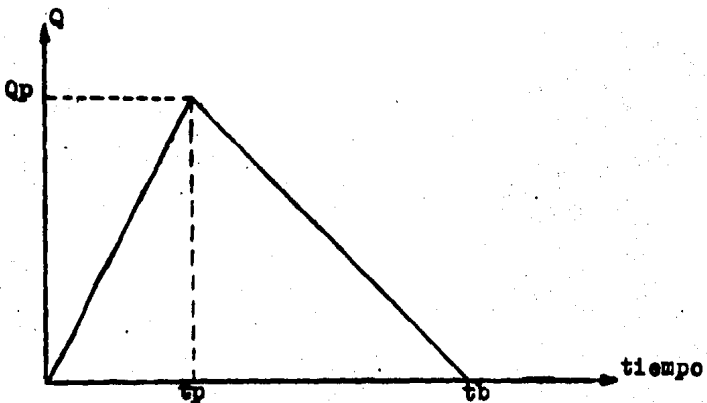
L = Longitud del cauce principal, en metros.

S = Pendiente media del cauce, en porcentaje.

Este valor del tiempo de pico, es igual al tiempo de concentración.

Si el cauce es una corriente perenne, el Gasto máximo de Diseño será igual al Gasto Base más el Gasto de pico.

La Avenida de Diseño será el Hidrograma Triangular construido, que tendrá la siguiente forma:



III.B.2) Método de Chow.

El Método de Chow tiene como resultado final la selección de un Gasto de Diseño entre varios Gastos máximos obtenidos de acuerdo a un determinado Período de Retorno.

El procedimiento fué deducido basándose en el concepto de Hidrograma Unitario, y es aplicable únicamente en Cuencas Pequeñas.

Una Cuenca Pequeña es aquella cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, donde predominan las características físicas del suelo con respecto al cauce, teniendo como límite superior, para efectos prácticos, un área de 250 Km².

La expresión para obtener el Gasto Máximo es la siguiente:

$$Q = A \times y \times z$$

dónde

- Q = Gasto en m³/seg
- A = Área de la cuenca en Km².
- x = Factor de escurrimiento en cm³/hora.
- y = Factor Climático.
- z = Factor de Reducción de pico.

El factor de Escurrimiento (x) es igual a $\frac{Peb}{d}$

dónde:

- d = Duración de la tormenta (se supone).
- Peb = Precipitación en exceso en la estación base, está dada en cm., (La Estación Base es la del pluviógrafo representativo).

El valor de 'Peb' está dado por la expresión:

$$Peb = \frac{(Pb - (508/N) + 5.08)^2}{Pb + (2032/N) - 20.32}$$

N = Número de escurrimiento (De acuerdo al tipo y uso del suelo, cuadro III.3 del inciso anterior).

Pb = Precipitación en la estación base, en cm.
Con las curvas i-d-T, se supone una duración de la tormenta y con el período de Retorno de la obra que se trate, obtenemos la intensidad de lluvia.

El factor climático (y) es igual a $2.78 \frac{P}{Pb}$

dónde:

P = Lluvia media en la cuenca; (cm)

El factor de reducción de pico (z) se obtiene de una gráfica (III.4) entrando con el valor de 'd/tp'

$$\text{tiempo de pico (tp)} = 0.005(L/(S))^{0.5} 0.64$$

tp = tiempo de pico (horas) = tiempo de concentración.

L = Longitud del cauce, en metros.

S = Pendiente del cauce, en porcentaje.

Finalmente, calculamos el Gasto máximo $Q = Axyz$

Los datos para utilizar el Método de Chow son:

Fisiográficos: Área de la cuenca, tipo y uso del suelo, longitud y pendiente del cauce principal.

Climatológicos: Curvas $i-d-T$ y la forma de ligar la cuenca con la estación base.

El procedimiento de cálculo es como sigue:

a) Con los datos de uso y tipo de suelo, se obtiene el valor del número de escurrimiento 'N' usando el cuadro III.3 .

b) Se escoge una duración de lluvia arbitraria.

c) De la curva $i-d-T$ y con los valores de la duración de lluvia y período de retorno, se obtiene el valor de la intensidad; multiplicando ésta por la duración se obtiene 'Pb'.

d) Con el valor de N, Pb se determina la 'Peb'

e) Con los valores de 'Peb' y la duración de lluvia, calculamos el factor 'x'.

f) Calculamos el factor 'y'.

g) Se obtiene 'z' del cuadro III.4 una vez obtenida la relación d/tp .

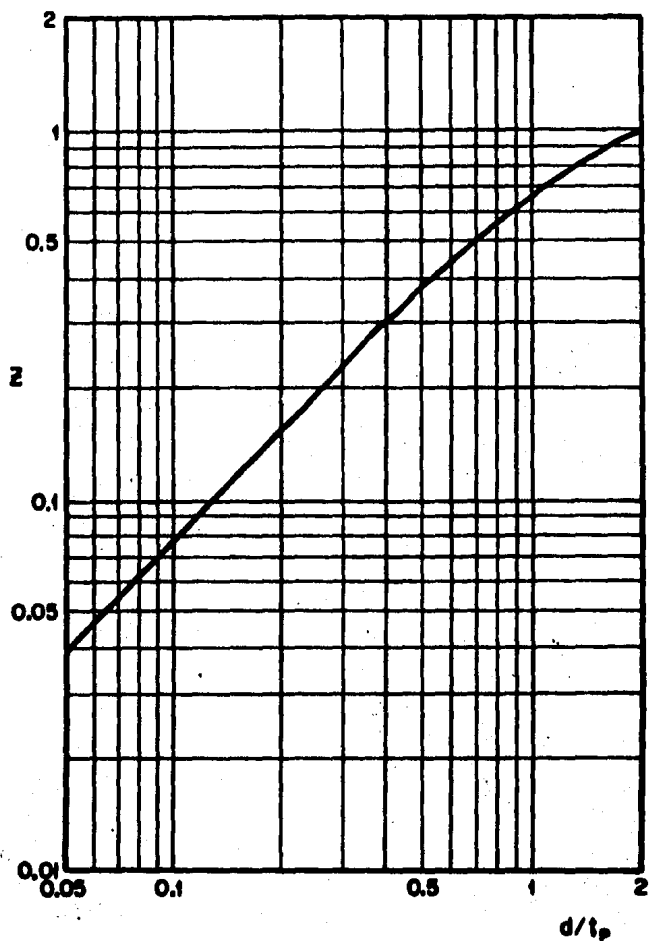
h) Se calcula el Gasto máximo $Q = Axzy$

i) Se repite la secuela de cálculo con otras duraciones de lluvia.

j) Graficamos duraciones contra Gastos máximos y el mayor de éstos será nuestro Gasto de Diseño.

k) Como el criterio de Chow está basado en la teoría del Hidrograma Unitario, el gasto obtenido es Gasto directo.

La Avenida de Diseño se obtiene con Hidrograma triangular, con los datos de Gasto de Diseño (Gasto de pico) y tiempos base y de pico.



Cuadro III.4
Relación entre Z y d/t_p

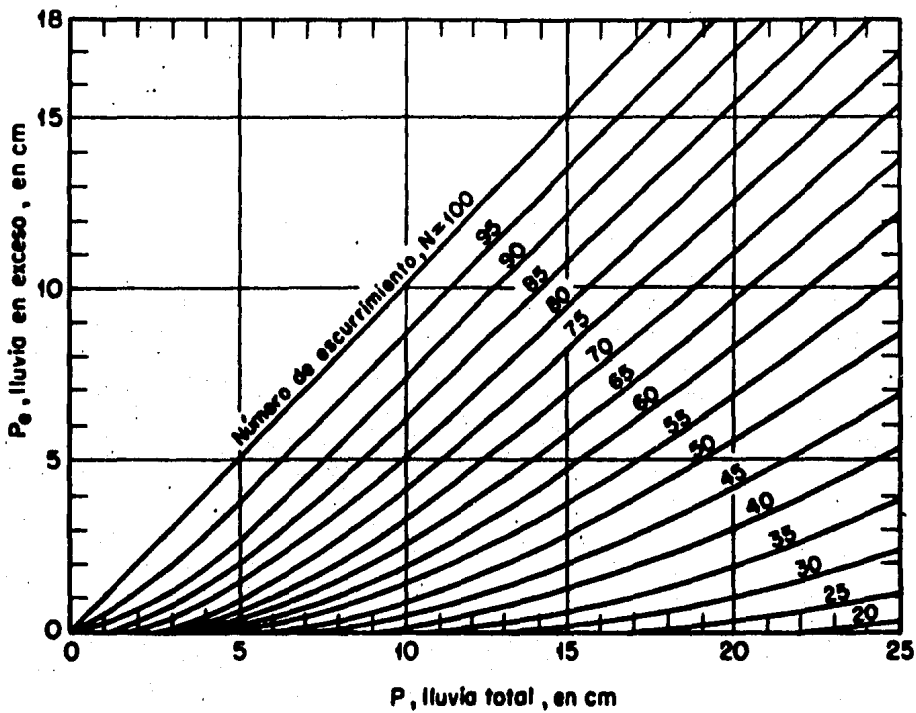


Fig 1. Relación entre la lluvia total y la lluvia en exceso para diferentes números de escurrimiento

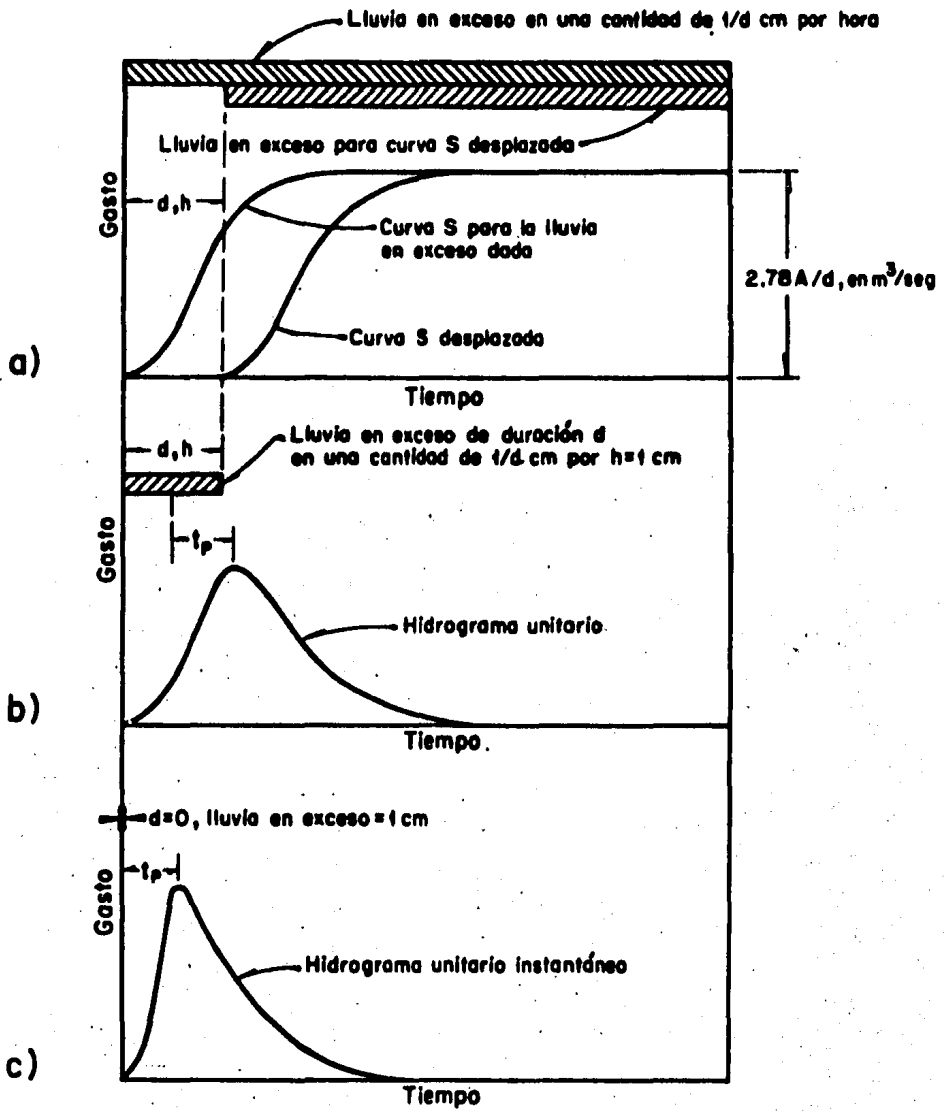


Fig 2. Relación esquemática entre la duración, d , y el tiempo de retraso, t_p

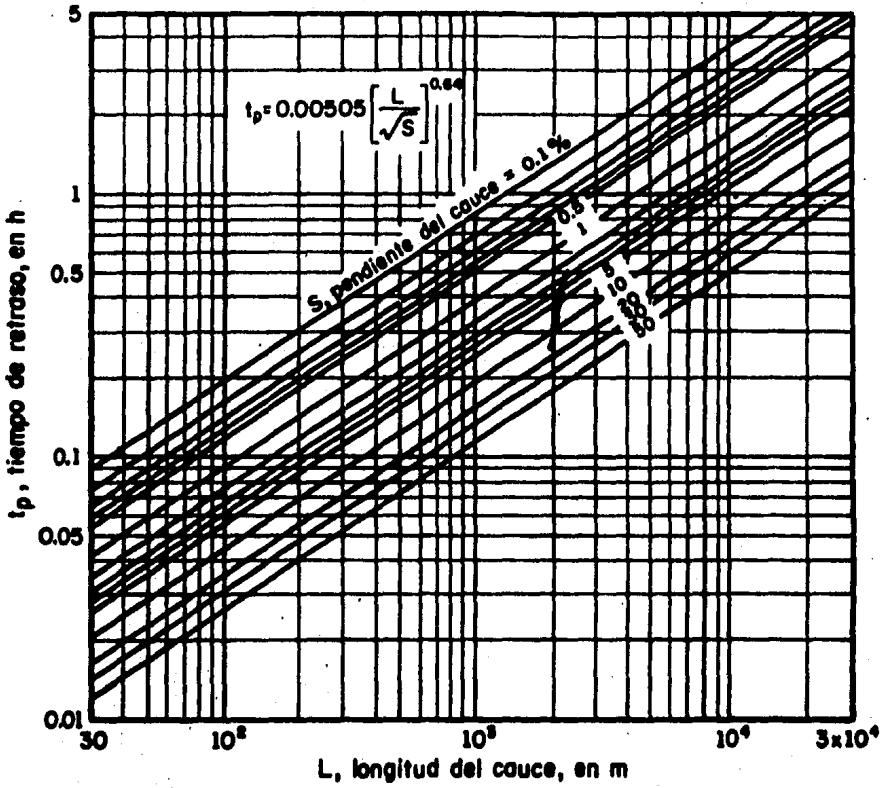


Fig 3. Determinación del tiempo de retraso

III.B.3) Método Racional

El Método Racional se usa principalmente en zonas urbanas, y en general, casi siempre se aplica en cuencas pequeñas.

Su expresión $Q = \frac{C i A}{360}$ nos dá el valor del gasto de diseño.

Q = Gasto en m³/seg.

i = Intensidad de lluvia, en mm/hora

A = Area en hectáreas.

C = Coeficiente de escurrimiento.

La duración de la tormenta, se valda como el doble del tiempo de concentración, el cuál es igual a:

$$t_c = 0.005 (L/S^{0.5})^{0.64}$$

L = Longitud del cauce principal.

S = Pendiente del cauce principal. (Media).

Se requiere como dato también las curvas i-d-T, para poder obtener la intensidad de lluvia a partir de los datos conocidos de período de Retorno y duración de la tormenta.

Conocido el coeficiente de escurrimiento 'C', se sustituyen valores en la expresión inicial y obtenemos el gasto de diseño.

La Avenida de Diseño será igual al Hidrograma triangular con los datos de Gasto de Diseño obtenido, tiempo base (igual al tiempo de concentración), y tiempo de pico, ($t_b = 2.78 t_p$) y se construye análogamente al explicado en el segundo inciso de este capítulo.

III.B.4) Método de I-Pai-Wu.

El método de I-Pai-Wu se basa en el modelo lineal propuesto por Nash para obtener hidrogramas unitarios instantáneos. El modelo de Nash asimila una cuenca a un sistema de 'n' recipientes lineales iguales, con el mismo coeficiente de almacenaje 'K', colocados en serie.

Desarrollando el modelo de Nash, I-Pai-Wu llegó a la siguiente expresión para calcular el gasto máximo en una cuenca, para una precipitación dada:

$$Q_{\max} = \frac{2.78 A P_e}{t_m} f(n, t_m)$$

dónde A = Área de la cuenca en Km²

Pe = Precipitación en exceso en cm.

tm = tiempo de pico, en horas.

f(n, tm) = parámetro adimensional deducido por I-Pai-Wu.

Qmax = Gasto máximo en m³/seg.

Para aplicar el Método de I-Pai-Wu, se requieren los datos fisiográficos de Área de la Cuenca por estudiar, Longitud del cauce principal, Pendiente media del mismo, Tipos y uso del suelo en la cuenca. Asimismo, las curvas i-d-T como dato climatológico.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- a) Con el tipo y uso de suelo, se calcula el valor del número de escurrimiento 'N', según se vió en el procedimiento III.B.2 (Precipitación Máxima Probable).
- b) Se escoge la duración de la tormenta más desfavorable 'd'.

La expresión del Gasto máximo indica que éste es proporcional a la 'Pe' (Precipitación en exceso) e independiente de la duración de la tormenta 'd', la cuál está implícita en 'Pe'. De ésta forma, se requiere conocer la duración más desfavorable, la cuál, según I-Pai-Wu se aproxima al valor del tiempo de pico, el cuál se obtiene con la fórmula siguiente:

$$t_m = 4660 A^{1.085} L^{-1.233} S^{-0.668}$$

Siendo

A = Area de la cuenca. (Km²)

L = Longitud del cauce principal. (metros)

S = Pendiente media del cauce principal. (%)

t_m = Tiempo de pico, en horas.

c) De las curvas i-d-T, con la duración escogida y el período de retorno 'T' con que se desea calcular el gasto máximo, se determina la intensidad de lluvia. Multiplicando la intensidad de lluvia por su duración correspondiente, se obtiene la precipitación total 'Pb' en centímetros.

d) La precipitación en exceso 'Pe', se obtiene con la expresión siguiente:

$$P_e = \frac{(P - (508/N) + 5.08)^2}{(P + (2032/N) - 20.32)}$$

siendo P = Precipitación total registrada.

e) Si la estación base no está en la cuenca en estudio, se deberá transportar la tormenta.

La transposición puede hacerse con la siguiente expresión, que es usada por Chow.

$$Pe = P_{eb} \frac{P}{P_b}$$

P_{eb} = Precipitación en exceso en la estación base.

P_b = Precipitación en la estación base.

P = " " " cuenca en estudio.

Pe = Lluvia en exceso en la cuenca en estudio.

f) Con la relación K_1/tm y usando el cuadro III.5 se obtiene el valor del parámetro 'n'.

$$K_1 = 19300 A^{0.937} L^{-1.474} S^{-1.473} \quad (\text{horas})$$

K_1 = Coeficiente de almacenaje de una cuenca. (horas)

A = Area de la cuenca, en Km^2 .

L = Longitud del cauce principal, en metros.

S = Pendiente media del cauce, en porcentaje.

g) Conocida 'n' se calcula $f(n, tm)$ con la ecuación:

$$f(n, tm) = \frac{(n-1)^n e^{1-n}}{\Gamma(n)}$$

para $\Gamma(n)$ = Función gamma con argumento 'n'.
(Explicación al final del procedimiento).

h) Con los valores obtenidos previamente, se calcula el gasto máximo.

i) Con los valores de Gasto máximo, tiempo de pico y 'n', se obtiene el hidrograma correspondiente empleando los hidrogramas instantáneos adimensionales del cuadro (III.6).

Como puede verse, el método de I-Pai-Wu nos proporciona el Hidrograma de la Avenida de Diseño, a partir del Gasto máximo y de gráficas deducidas por él, que nos evitan la utilización del hasta cierto punto inexacto Hidrograma Triangular.

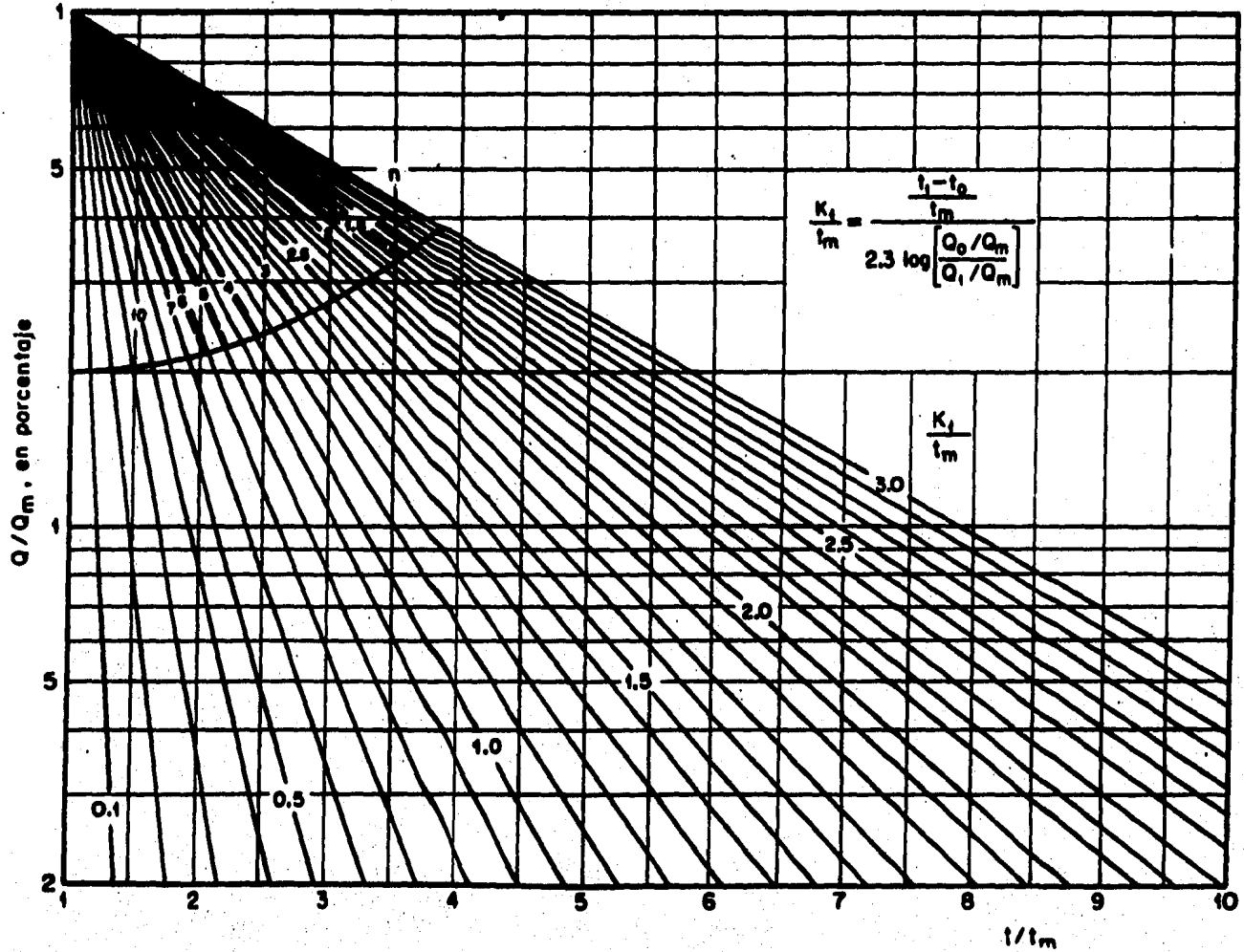
Función Gamma.

Euler define la función Gamma como la siguiente integral:

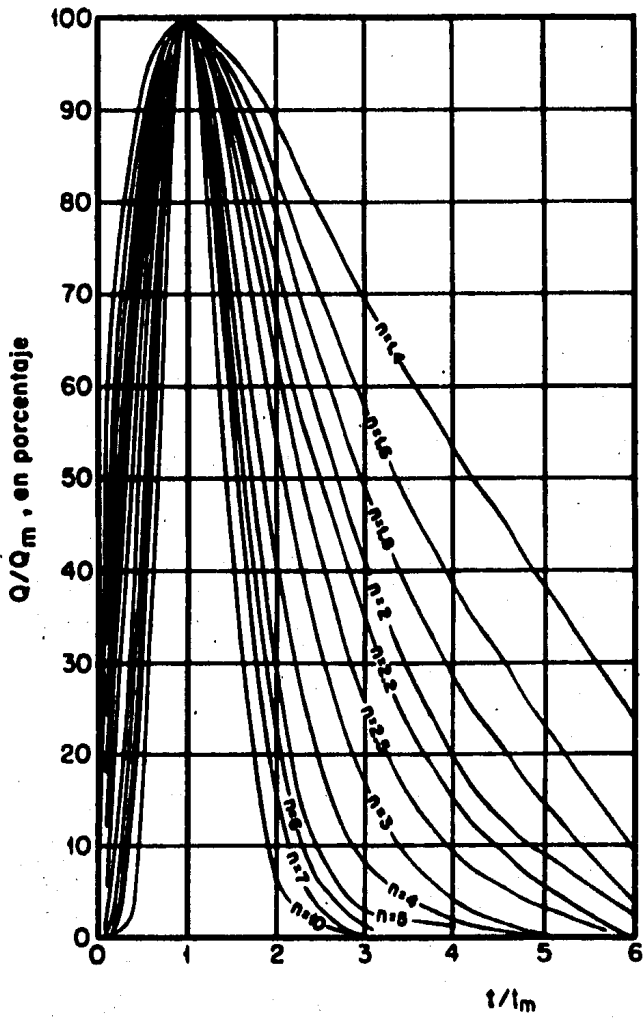
$$\Gamma(n) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx$$

Para valores de 'n' mayores que cero.

Para el procedimiento de I-Pai-Wu, se sustituye el valor del parámetro 'n' y se resuelve la integral, obteniéndose el valor de la función gamma.



Relación entre n y K₁/h
Cuadro III.5



Quadro III.6
 Hidrograma instantâneo adimensional

III.B.5) Método de Regionalización de Gumbel.

La Avenida de Diseño de una Obra Hidráulica se calcula para un determinado periodo de Retorno. Cuando se carece de registros con el suficiente número de años para hacer estimaciones muy a futuro, es conveniente analizar la información disponible con apoyo en registros del mismo evento dentro de un área relativamente igual a la que se estudia.

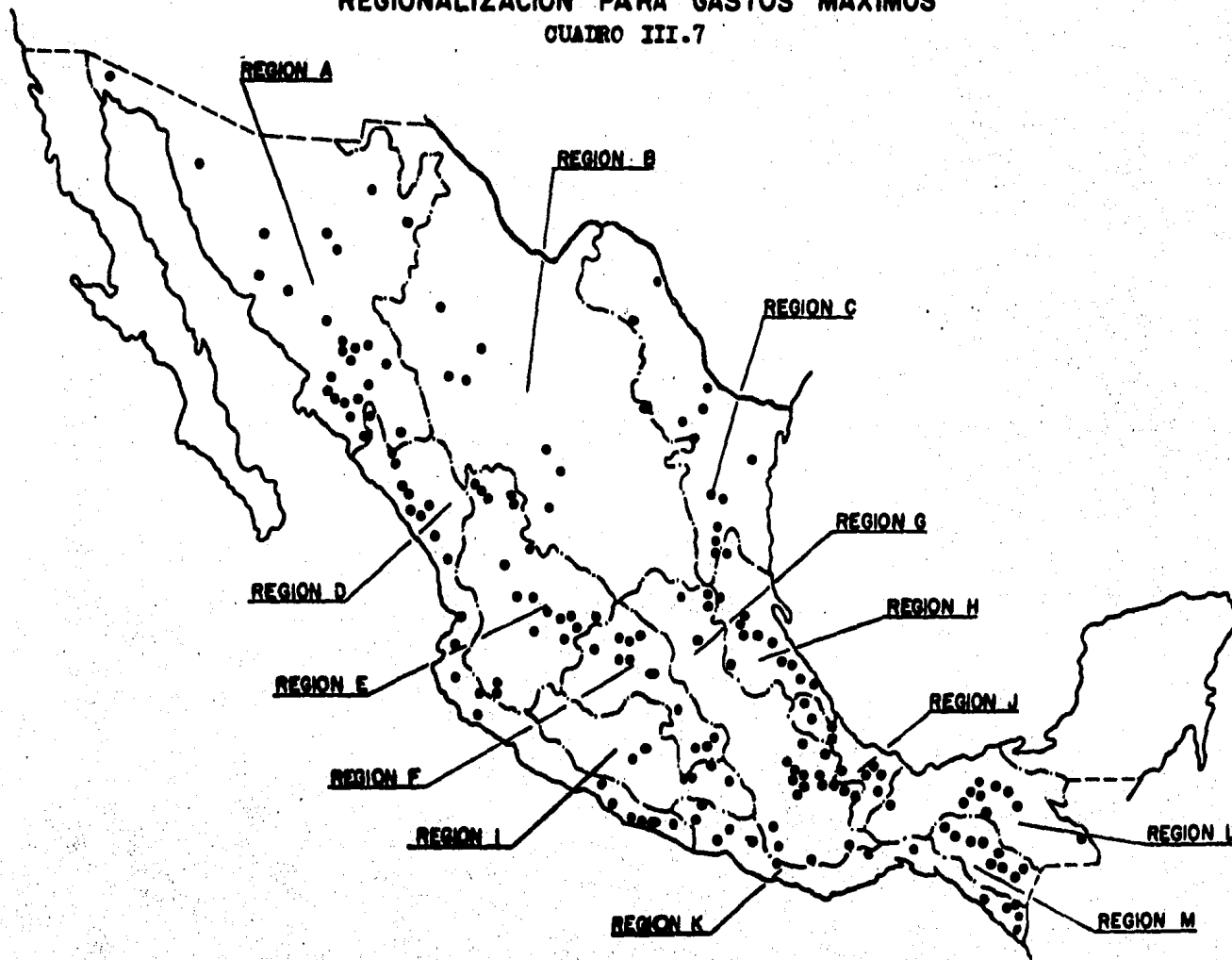
Quando se desea estimar una Avenida cuyo periodo de Retorno es 5 veces mayor que el número de años de que se tiene registro, se utiliza el Método de Regionalización de Gumbel, conocido como Método de la Estación-Año.

Este criterio se basa en la idea de que todas las estaciones de registro, si están localizadas en una zona meteorológicamente homogénea (Área en donde la probabilidad de ocurrencia de una tormenta de cualquier intensidad dada es la misma en cualquier punto), experimentan frecuencias de lluvia similares, y que si estas estaciones están lo suficientemente separadas, el total de las experiencias de todas las estaciones, será similar a la experiencia de cualquiera de las estaciones individuales.

Para estimar el gasto máximo anual para diferentes periodos de retorno, se ha realizado por parte del Plan Nacional Hidráulico, una regionalización de gastos máximos, para lo cual ha dividido al país en 13 regiones homogéneas, con un total de 3721 estaciones-año y 206 estaciones en donde los registros de gastos máximos tienen un periodo mínimo de 8 años y las series de gastos máximos anuales son independientes entre sí.

REGIONALIZACION PARA GASTOS MAXIMOS

CUADRO III.7



El gasto máximo está dado por:

$$Q_{tr} = A Y_{tr} + B$$

donde Q_{tr} = Gasto máximo para un periodo de retorno 'tr'.

Y_{tr} = Variable normalizada para un periodo de retorno 'tr', se determina para cada región homogénea.

A,B = Parámetros regionales de Gumbel estimados con ecuaciones del cuadro III.9 .

El valor de ' Y_{tr} ' se determina con las gráficas de la figura III.8 , entrando con el valor del periodo de Retorno.

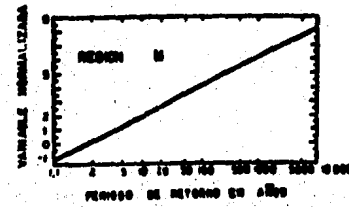
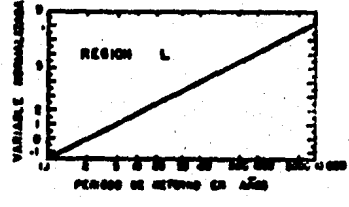
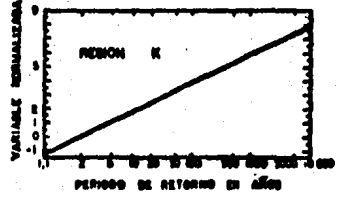
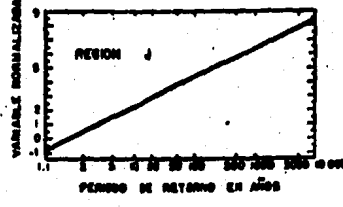
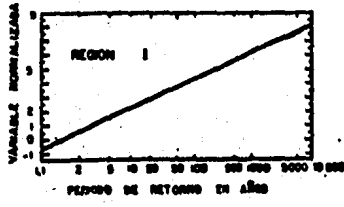
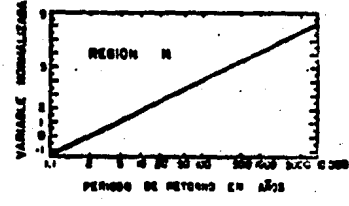
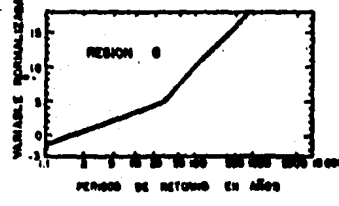
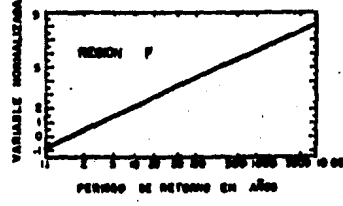
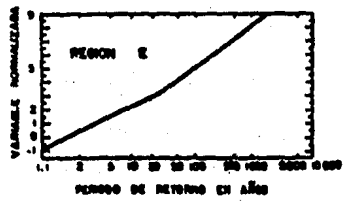
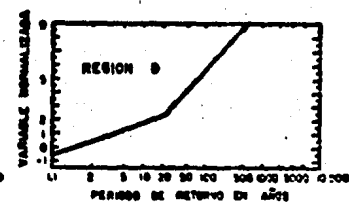
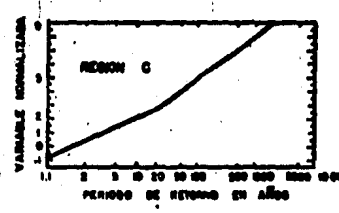
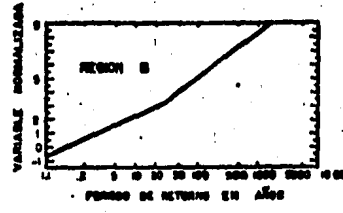
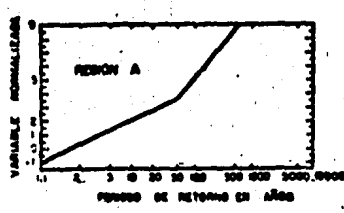
Con los datos de Area de la cuenca en km^2 , precipitación máxima en 24 horas (en milímetros), y periodo de retorno en años, longitud del cauce principal en Km, precipitación media anual en mm., y pendiente del cauce en fracción, podemos determinar el valor de los parámetros A,B del cuadro III.9 .

El valor de los gastos máximos se consideran válidos para cuencas cuya superficie esté comprendida entre 500 y 1,500 km^2 , y pendientes menores del 6%.

La Avenida de Diseño puede construirse con un Hidrograma triangular, conociendo los valores de tiempo de pico (igual al tiempo de concentración, ya explicado), tiempo base (2.78 veces el tiempo de pico) y el valor de Gasto base, el cuál puede deducirse restando

ESTIMACION DE LA VARIABLE NORMALIZADA PARA LA REGIONALIZACION
DE GASTOS MAXIMOS

cuadro III.8
Estimación de Y_{Tr}



ECUACIONES REGIONALES DE GASTOS MAXIMOS

cuadro III.9

REGION	PARAMETRO REGIONAL PARA GASTOS MAXIMOS	
	A	B
A	$\frac{L^{0.62} AR^{0.32} S^{0.31} p^{1.16}}{10.18}$	$\frac{L^{0.24} AR^{0.36} p^{0.62} j^{1.01}}{547.95}$
B	$\frac{L^{1.73} AR^{0.25} S^{2.48} p^{2.01}}{1.07 j^{2.29}}$	$\frac{173407 L^{1.01} S^{4.10} p^{3.87}}{AR^{0.60} j^{1.60}}$
C	$\frac{AR^{0.86} S^{0.22} p^{1.12}}{1.13 L^{0.42} j^{0.43}}$	$\frac{AR^{0.01} S^{0.16} p^{0.77}}{2.16 L^{0.20}}$
D	$\frac{5.71 AR^{0.33} j^{1.21}}{L^{0.10} p^{0.71}}$	$\frac{AR^{0.07} p^{0.558} j^{0.06}}{2267 L^{0.07} S^{0.50}}$
E	$\frac{AR^{0.30} p^{1.48}}{6136 j^{0.09} S^{0.26} L^{0.21}}$	$\frac{L^{0.30} AR^{0.82} S^{0.30} p^{2.65}}{0.16 j^{0.00}}$
F	$\frac{3.82 AR^{0.30} S^{0.07} j^{1.01}}{p^{0.76}}$	$\frac{1.21 AR^{0.40} S^{0.06} j^{1.77}}{p^{0.80}}$
G	$\frac{AR^{0.44} j^{0.00}}{15.5 A^{0.06}}$	$\frac{AR^{0.01} p^{0.72} j^{0.02}}{529 L^{0.20} S^{0.56}}$
H	$\frac{L^{0.33} AR^{0.20} S^{0.13} p^{0.36} j^{0.71}}{12.40}$	$\frac{AR^{0.02} L^{0.32} p^{1.77} j^{0.62}}{1794074.77}$
I	$\frac{AR^{0.44} j^{2.30}}{29375 S^{0.07} p^{0.02}}$	$\frac{AR^{0.40} j^{2.40}}{117 S^{0.02} p^{1.20}}$
J	$\frac{22 AR^{0.01} p^{0.00}}{j^{1.14} L^{0.10}}$	$\frac{AR^{0.00} j^{1.00}}{149 L^{0.17}}$
K	$\frac{2626 L^{0.61}}{S^{0.00} p^{0.04} j^{0.00}}$	$\frac{AR^{0.05} p^{0.22} j^{0.70}}{250 S^{0.00}}$
L	$\frac{0.000 L^{0.00} S^{1.46}}{AR^{0.02} j^{0.00}}$	$\frac{0.000 L^{1.00} S^{1.26} p^{0.60}}{j^{0.00} AR^{0.02}}$
M	$\frac{AR^{0.20} S^{0.27} p^{0.35} j^{0.00}}{4.8 L^{0.23}}$	$\frac{AR^{0.04} S^{0.42} p^{1.20} j^{0.00}}{2379 L^{0.00}}$

- AR Area de la cuenca, en km²
- j Precipitación máxima en 24 hs y periodo de retorno de 10 años, en mm
- L Longitud del cauce principal, en km
- p Precipitación media anual, en mm
- S Pendiente del cauce, en fracción

al gasto máximo, el gasto de pico.

III.B.6) Método Empírico de Gregory-Arnold.

El presente Método se aplica en lugares dónde no se dispone de aforos y tiene como expresión fundamental la siguiente:

$$Q = C i A$$

... la cual deriva en :

$$Q = 0.2086 (CAE_n FB)^{1.1429} H^{0.5714} g^{0.2143}$$

en dónde:

Q = Gasto en m³/seg.

C = Coeficiente de Escurrimiento, correspondiente a Avenidas.

A = Area de la cuenca en hectáreas.

E_n = x/H = Intensidad media de la lluvia en centímetros por hora para un tiempo 'H'.

H = Tiempo considerado para el cálculo, expresado en horas.

X = Lluvia máxima total en centímetros para el tiempo de 'H' horas.

Es difícil conocer el período 'H' en que se produjo la altura de lluvia registrada, por haber pocos pluviómetros en la república, estando generalmente las observaciones de lluvia máxima referidas a 24 horas. Según las condiciones locales, se aplicará el criterio de suponer un tiempo 'H' de concentración de la precipitación registrada en 24 horas, de 1 a 3 horas para cuencas hasta de 40 Km², y de 3 a 24 horas para cuencas mayores de 40 Km².

F = Factor que depende de la forma y naturaleza del cauce del río; se calcula con la ayuda de la tabla número 4. B = P/L .

P = Factor que depende de la forma de la cuenca y del modo de concentración del agua en ella; para su determinación se encuentra primero la relación L/W en la que 'L' es la longitud en metros que el agua recorre desde el punto más lejano de la cuenca, hasta el sitio de proyecto, y se determina del levantamiento topográfico de la cuenca ó de una carta geográfica.

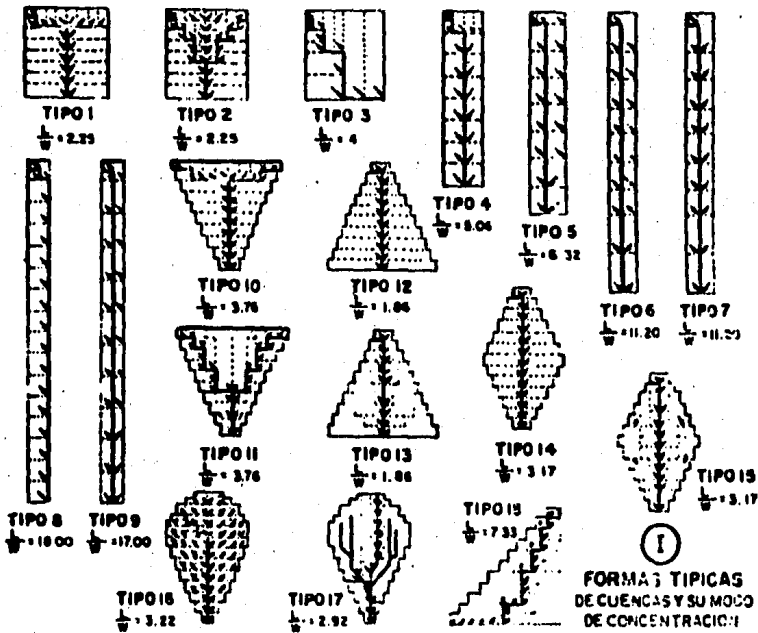
$$W = 10,000 A/L$$

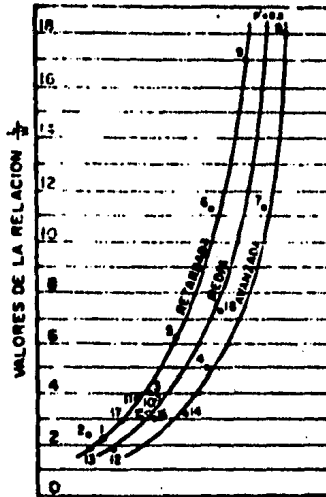
Con el valor de L/W se entra en la figura 1 con objeto de elegir el tipo de cuenca; con éstos datos se entra a la gráfica 2 para determinar la forma de concentración de las aguas. El símbolo P' es una constante que depende del núcleo inicial de concentración de las lluvias y A' el área en hectáreas del núcleo inicial; P' y A' son difíciles de determinar, por lo que se recomienda para la aplicación de éstas fórmulas considerar $P'=0.5$ así como $A/A' = 262144$. Con éstos datos se entra a la tabla 3 que nos dá el valor del factor P.

S = Caída por cada 1000 metros del cauce principal (Se toma de las elevaciones de la carta geográfica empleada ó del plano topográfico de la cuenca; ej., si la pendiente es de 18 metros en 1000, entonces $S=18$).

Puede utilizarse el procedimiento del Hidrograma Triangular para obtener la Avenida de Diseño, toda vez que se ha calculado el Gasto Máximo.

Figura 1 - Formas típicas de cuencas y su modo de concentración.





II) GRAFICA AUXILIAR
PARA DETERMINAR LA FORMA DE CONCENTRACION

III) VALORES DEL FACTOR "P" PARA P:0.5 Y A = 262144

CONCENTRACION

L W	TORRENTAS DE IN- TENSIDAD UNIFORME			CURVA DE PRECIPITA- CION DE LA FMA 11-73		
	RETR.	MED	AVAN.	RETR.	MED	AVAN.
2	0.42	0.44	0.47	0.47	0.49	0.52
3	0.44	0.47	0.49	0.50	0.53	0.56
4	0.46	0.49	0.51	0.53	0.55	0.58
8	0.50	0.53	0.57	0.58	0.61	0.64
16	0.56	0.59	0.62	0.64	0.67	0.70

Gráfica II - Calculadas las relaciones $W, I/W$ y elegido el tipo de cuenca guiándose por los esquemas de la figura 1, se determina el tipo de concentración con ésta gráfica 2.

Tabla III - Con el tipo de concentración obtenido se calcula el valor de 'P' y por último el factor 'B' por la relación $(P/L)^{1/2}$.

IV VALORES DEL FACTOR 'F' PARA SECCIONES ABIERTAS CON PAREDES INCLINADAS									
TALUD	ANCHO DEL FONDO POR LA ALTURA	VALOR DE 'n' (KUTTER)							
		0.011	0.013	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035	0.100
1/2:1	FORMA EN V	7.31	6.82	6.40	5.72	5.33	5.00	4.74	3.19
	1 POR 1	7.65	7.12	6.69	5.99	5.58	5.23	4.93	3.34
	2 POR 1	7.81	7.10	6.66	5.96	5.54	5.20	4.94	3.33
	4 POR 1	7.45	6.95	6.52	5.83	5.43	5.09	4.83	3.28
	8 POR 1	7.12	6.64	6.23	5.58	5.18	4.87	4.62	3.11
	16 POR 1	6.68	6.23	5.85	5.24	4.85	4.57	4.34	2.92
	30 POR 1	6.23	5.88	5.50	4.91	4.54	4.29	4.07	2.75
	100 POR 1	5.45	5.08	4.77	4.25	3.97	3.72	3.53	2.38
1:1	FORMA EN V	7.91	7.00	6.56	5.97	5.48	5.13	4.87	3.28
	1 POR 1	7.80	7.08	6.64	5.85	5.44	5.19	4.92	3.32
	2 POR 1	7.54	7.03	6.60	5.90	5.50	5.15	4.89	3.30
	4 POR 1	7.37	6.87	6.45	5.76	5.37	5.04	4.77	3.22
	8 POR 1	7.07	6.57	6.17	5.53	5.15	4.83	4.58	3.09
	16 POR 1	6.68	6.21	5.83	5.23	4.87	4.55	4.32	2.91
	30 POR 1	6.25	5.81	5.47	4.89	4.55	4.27	4.03	2.72
	100 POR 1	5.45	5.07	4.76	4.25	3.97	3.73	3.53	2.38
2:1	FORMA EN V	7.31	6.82	6.40	5.72	5.33	5.00	4.74	3.19
	1 POR 1	7.31	6.82	6.40	5.72	5.33	5.00	4.74	3.19
	2 POR 1	7.27	6.78	6.36	5.70	5.30	4.97	4.72	3.18
	4 POR 1	7.18	6.69	6.25	5.59	5.21	4.88	4.64	3.12
	8 POR 1	6.90	6.44	6.05	5.40	5.04	4.71	4.48	3.03
	16 POR 1	6.58	6.12	5.73	5.15	4.80	4.49	4.27	2.88
	30 POR 1	6.20	5.76	5.41	4.85	4.52	4.23	4.01	2.70
	100 POR 1	5.42	5.06	4.72	4.22	3.93	3.70	3.52	2.37
3:1	FORMA EN V	7.04	6.58	6.17	5.51	5.14	4.83	4.57	3.08
	1 POR 1	7.04	6.58	6.17	5.51	5.14	4.83	4.57	3.08
	2 POR 1	7.01	6.53	6.14	5.49	5.12	4.79	4.54	3.08
	4 POR 1	6.95	6.45	6.07	5.45	5.08	4.74	4.50	3.03
	8 POR 1	6.75	6.25	5.90	5.26	4.92	4.61	4.38	2.96
	16 POR 1	6.48	6.04	5.67	5.07	4.73	4.43	4.20	2.83
	30 POR 1	6.14	5.72	5.39	4.81	4.49	4.20	3.99	2.68
	100 POR 1	5.40	5.03	4.72	4.22	3.93	3.69	3.50	2.36

Tabla 4 - El factor 'F' se toma de ésta tabla una vez elegido el coeficiente de rugosidad 'n', los taludes y la relación entre el tirante y el ancho del fondo del cauce principal.

III.C) Características Fisiográficas.

Existen cuencas en las que únicamente se conocen sus características fisiográficas tales como Area, Pendiente, etc., y no existen en ella Estaciones Hidrométricas ni Climatológicas.

Si se desea construir alguna Obra Hidráulica, de tal manera que sea necesario determinar la Avenida de Diseño que pudiera presentarse, los resultados que pudieran obtenerse serían dudosos, ya que los procedimientos utilizados son en su mayoría de carácter empírico.

Se describirá uno de éstos métodos, entre los muchos existentes.

III.C.1) Método Empírico de Greager.

Para la aplicación de éste Método, se requiere conocer únicamente el Area de la Cuenca en estudio.

Su expresión es:

$$Q/A = 1.303 C (0.386 A)^a$$

dónde:

Q = Gasto máximo en m³/seg.

A = Area de la cuenca, en Km².

C = Coeficiente de escurrimiento que se valda de acuerdo a la región.

$$a = 0.936/A^{0.048}$$

El valor del coeficiente 'C' es igual a 70 en el caso de México, aunque existen valores de éste parámetro según la región. Para el resto del mundo puede tomarse como válido el valor de 100.

Este método nos dá como resultado un Gasto máximo, pero no dá una idea sobre la Avenida que se produce, de suerte que no conocemos la distribución de Gastos en el tiempo.

Así, la escasez de datos sobre la cuenca causa que el resultado obtenido sea sólo una referencia y no una base para el posible Diseño de una Obra Hidráulica.

III.D) Control Hidrométrico.

Cuando en las cuencas que se estudian no existen registros de precipitación ni se conoce la fisiografía de las mismas, debe recurrirse frecuentemente a métodos estadísticos que correlacionen los gastos máximos que se presentan en el cauce, con su período de retorno. Es decir, cuando se tienen como datos únicamente los gastos medidos por la Estación Hidrométrica que controla la cuenca, el Gasto de Diseño se calcula con Métodos Estadísticos.

Existen una gran cantidad de métodos para determinar el Gasto Máximo, el que se debe usar es aquél que mejor se apege al registro con que se cuente. Dentro de éstos métodos están el de Gumbel, Normal, Nash, etc. y se describirán sólo los más usados.

III.D.1) Método Estadístico de Gumbel.

De los registros que se tengan en la cuenca sobre la medición de gastos, deben seleccionarse los máximos anuales, para establecer la relación entre su magnitud y su período de retorno. El procedimiento para obtener el Gasto de Diseño es el siguiente:

a) Se calcula el Gasto Máximo, para el período de retorno que se desee, con la expresión de Gumbel, toda vez que se han ordenado los gastos máximos anuales de mayor a menor, y cada uno con su período de retorno correspondiente.

$$Q_{\max} = Q_{\text{medio}} + K S_x$$

siendo Q_{\max} = Gasto máximo.

\bar{Q} medio = Valor medio de gastos de la muestra.

K = Factor de frecuencia.

S_x = Desviación estándar de los gastos.

El factor de frecuencia 'K' se incrementa con el período de retorno, con una relación funcional que depende de la distribución propuesta, en éste caso, depende del tamaño de la muestra y del período de retorno que se desca estimar. Su valor está dado en el cuadro III.10

El hecho de que la ecuación anterior represente a una línea recta (si se grafica en un papel de probabilidades especial Gasto contra período de retorno), no implica que los datos de la muestra analizada estén sobre la línea, por lo que es necesario obtener el intervalo de confianza de los resultados obtenidos del análisis de frecuencias. Gumbel propone para calcular los intervalos de confianza con una probabilidad del 68%, lo siguiente:

Para el valor más grande de la muestra analizada, que es el que nos interesa, el intervalo es igual a:

$$DQ = S_x F(n)$$

dónde DQ = Intervalo de confianza.

$F(n)$ = Función del tamaño de la muestra, se calcula con el cuadro III.11

S_x = Desviación estándar de la muestra.

Para el segundo valor más grande de la muestra, el intervalo de confianza es:

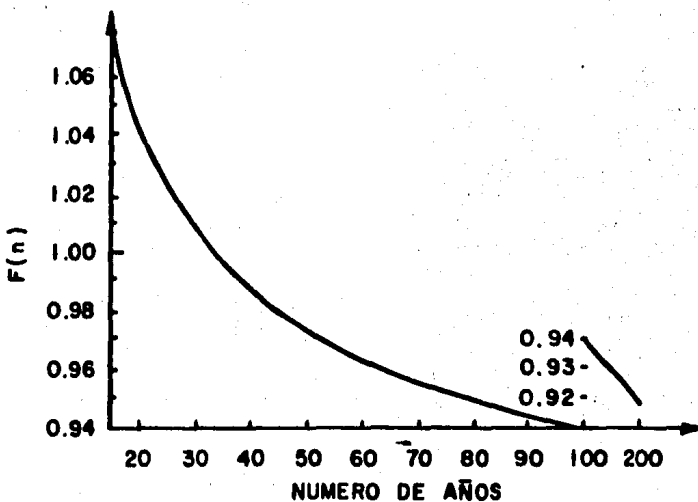
$$DQ_2 = \frac{0.661 (n+1)}{n-1} DQ$$

Quadro III.10

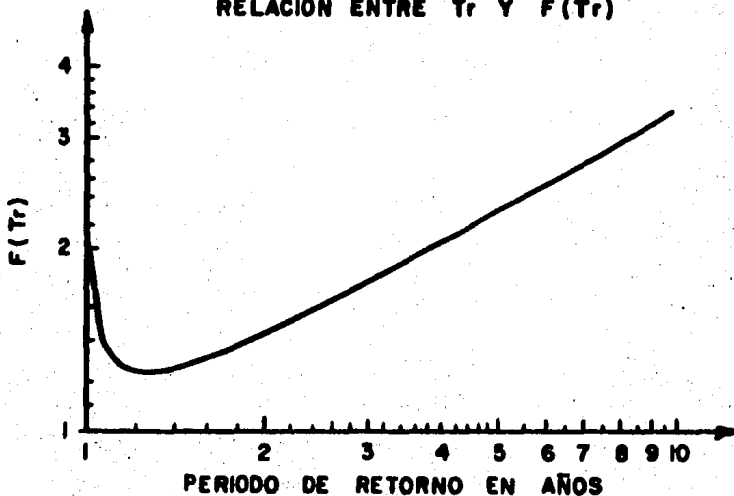
FACTOR DE FRECUENCIA K

NUMERO DE AÑOS	PERIODO DE RETORNO, EN AÑOS								
	5	10	25	50	100	500	1000	5000	10000
15	0.967	1.703	2.632	3.321	4.005	5.586	6.266	7.843	8.522
20	0.919	1.625	2.517	3.179	3.836	5.354	6.006	7.521	8.173
25	0.888	1.575	2.444	3.089	3.728	5.207	5.842	7.317	7.952
30	0.866	1.541	2.393	3.026	3.653	5.104	5.727	7.175	7.798
35	0.850	1.515	2.356	2.979	3.598	5.027	5.642	7.069	7.683
40	0.838	1.495	2.326	2.942	3.554	4.968	5.576	6.986	7.594
45	0.828	1.479	2.303	2.913	3.519	4.920	5.522	6.920	7.522
50	0.820	1.466	2.283	2.889	3.491	4.881	5.479	6.866	7.463
55	0.813	1.455	2.267	2.869	3.467	4.848	5.442	6.820	7.414
60	0.807	1.446	2.253	2.852	3.446	4.820	5.410	6.781	7.371
65	0.800	1.438	2.241	2.837	3.428	4.795	5.383	6.747	7.334
70	0.797	1.430	2.230	2.824	3.413	4.774	5.359	6.717	7.302
75	0.793	1.424	2.220	2.812	3.499	4.755	5.338	6.691	7.274
80	0.790	1.419	2.213	2.802	3.387	4.738	5.319	6.668	7.249
85	0.787	1.414	2.205	2.793	3.376	4.724	5.303	6.647	7.226
90	0.784	1.409	2.199	2.784	3.366	4.710	5.287	6.628	7.205
95	0.781	1.405	2.192	2.777	3.357	4.697	5.273	6.611	7.186
100	0.779	1.401	2.187	2.770	3.349	4.686	5.261	6.595	7.170

Cuadro III.11
RELACION ENTRE n Y $F(n)$



Cuadro III.12
RELACION ENTRE Tr Y $F(Tr)$



Para otros valores de la muestra, el intervalo de confianza es:

$$DQ_1 = \frac{0.877}{n} DQ F(Tr)$$

...dónde los valores de $F(Tr)$ se encuentran en el cuadro III.12 para períodos de retorno 'Tr' menores de 10 años.

Para valores mayores de 10 años, del 'Tr', se tiene que:

$$F(Tr) = Tr^{0.5}$$

... y el valor del período de retorno es el calculado por la fórmula de Weinbull, que es igual a:

$$Tr = \frac{n+1}{m}$$

Tr = Período de retorno, en años.

n = Número de años del registro.

m = Número de orden del gasto máximo, ordenado de mayor a menor.

El valor del período de retorno para el cuál se calcula el gasto máximo, no debe ser mayor de 4 veces el número de años del registro, ya que entonces la extrapolación que se hiciera estaría fuera de los límites que Chow propone como recomendables.

b) Obtener las características de los hidrogramas que generaron los gastos máximos anuales.

Al aplicar el criterio estadístico a los escurrimientos de un río para deducir el gasto máximo, se puede conocer la avenida relacionada con dicho gasto, a través de un análisis de los hidrogramas de las avenidas que han producido los gastos máximos anuales. De ellos, se determinan sus características de Gasto Máximo, Gasto de pico y Gasto base, así como los tiempos base, de pico.

Una forma para determinar el hidrograma con sólo conocer el gasto máximo, es la obtención de hidrogramas adimensionales del escurrimiento directo de cada avenida registrada. Para ésto, los gastos del escurrimiento directo de cada avenida se dividen entre su gasto de pico correspondiente, y las abscisas del tiempo entre su tiempo de pico.

Los hidrogramas adimensionales obtenidos tienen puntos en común $Q/Q_p = 1.0$ y también $t/t_p = 1.0$.

Para unificar la forma de los hidrogramas adimensionales obtenidos, puede obtenerse uno promedio de todos ellos.

c) Calcular los valores de Tiempo de pico y de Gasto Base.

Como el gasto máximo es el único dato obtenido del análisis estadístico de los gastos máximos anuales, se requiere encontrar una relación entre éste y sus gastos y tiempos de pico; también se necesita conocer el gasto base, ya que se desea conocer la Avenida total.

Las ecuaciones que pueden utilizarse son:

$$\log Q_p = a + b Q_{\max}$$

$$t_p = c Q_{\max}^d$$

De ésta forma pueden obtenerse los datos para definir el hidrograma para un gasto máximo, toda vez que mediante el procedimiento de Mínimos Cuadrados se hayan calculado los parámetros de ajuste a, b, c, d.

d) Cálculo del Gasto de Pico.

Con el gasto máximo obtenido, se sustituye éste valor en la ecuación de correlación, obteniendo el gasto base.

El gasto de pico será la diferencia entre el Máximo y el gasto base.

e) Determinación del hidrograma de escurrimiento directo.

Con los datos de gasto y tiempo de pico y apoyándonos en el hidrograma adimensional, se determina el hidrograma mencionado.

Finalmente, al hidrograma de escurrimiento directo se le agrega el gasto base, al cuál se considera constante en todo el tiempo base, obteniendo así la Avenida de Diseño para ése Gasto máximo, ó Gasto de Diseño.

III.D.2) Método Estadístico de Nash.

Este Método es muy similar al de Gumbel. Se seleccionan los Gastos máximos anuales de los años de registro hidrométrico que se tengan, ordenándolos de mayor a menor, y obteniendo su período de retorno de acuerdo a la fórmula de Weinbull.

$$T = \frac{n+1}{n}$$

La expresión para calcular el gasto máximo es la siguiente:

$$Q_{\text{máx}} = a + c \log \log \frac{T}{T-1}$$

Si hacemos cambios de variable: $y = Q$
 $x = \log \log \frac{T}{T-1}$

...la expresión se reduce a: $y = a + cx$

... siendo:
$$c = \frac{\sum x_i Q_i - n x_m Q_m}{\sum x_i^2 - n x_m^2}$$

$$a = Q_m - c x_m, \quad i=1,2,\dots,n$$

Los términos Q_m, x_m representan la media de los valores del gasto y de 'x' respectivamente, siendo 'n' el número de elementos de la muestra, ó sea, el número de gastos máximos.

La expresión de Nash para el Gasto máximo ó de Diseño requiere de un intervalo de confianza para el resultado que arroje, y éste será igual a:

$$DQ = \pm 2 \left(\frac{S_{qq}}{n^2(n-1)} + (x - x_m)^2 \frac{1}{(n-2)(S_{xx})} \left(S_{qq} - \frac{S_{xq}^2}{S_{xx}} \right) \right)^{1/2}$$

siendo $S_{xx} = n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2$

$$S_{qq} = n \sum Q_i^2 - (\sum Q_i)^2$$

$$S_{xq} = n \sum Q_i x_i - \sum Q_i \sum x_i$$

para $i=1, 2, \dots, n$

n = número de gastos máximos anuales.

De ésta forma, se ha determinado el valor del Gasto de Diseño en forma estadística, dependiendo del valor de un cierto período de Retorno.

La Avenida de Diseño se construye mediante el Hidrograma Adimensional, análogamente al Método Estadístico de Gumbel.

IV) Conclusiones y Recomendaciones.

- La exactitud ó incertidumbre en el cálculo de la magnitud de la Avenida de Diseño, depende, como se ha observado, del tipo y cantidad de información climatológica, hidrométrica y fisiográfica que se tenga de la Cuenca que se estudie.

- La gran aplicación del Hidrograma Unitario es que a partir de un solo análisis de Lluvia y Escurrimiento, pueden deducirse Escurrimientos conociendo únicamente las características de las nuevas Lluvias.

- El procedimiento de la Curva 'S', se basa en el principio de superposición de causas y efectos, partiendo de que una secuencia de lluvias produce un hidrograma igual a la suma de hidrogramas que produciría cada lluvia en particular. Su ventaja consiste en poder calcular el hidrograma unitario correspondiente a una duración en exceso cualquiera ' d_1 ', a partir de un hidrograma unitario asociado a una duración diferente ' d_0 '.

- La teoría del Hidrograma Unitario no considera las variaciones en la Intensidad de Lluvia en exceso. Para superar ésta situación, se emplea el Hidrograma Unitario Instantáneo, cuya premisa es considerar a cada intensidad de lluvia como si fuera una sola tormenta particular. El Hidrograma de Escurrimientos Directos totales es la Adición de los Hidrogramas producidos por cada intensidad de lluvia diferente.

- La Precipitación Máxima Probable, es un criterio muy conservador, dado que se fundamenta en un evento que por sus características extremas es muy difícil que ocurra. La tormenta de diseño que se deriva aplicando éste criterio es muy poco probable. El Costo de la Obra de Excedencias de una Obra Hidráulica depende directamente de ésa tormenta de Diseño, y consecuentemente, la factibilidad del proyecto. Así, se recomendaría que se usara otro criterio para comparar resultados y tomar una decisión más acorde con la realidad.

- La sencillez de la fórmula que se emplea en el Método Racional $Q=CiA/360$, que es conocida de los ingenieros que se dedican a la resolución de problemas de escurrimiento es ilusoria, porque para determinar el valor correcto del coeficiente 'C' y la intensidad de la precipitación 'i' se requiere un estudio hidrológico detallado para cada aplicación.

- El Método de I-Pai-Wu, tiene la ventaja sobre el Método de Chow, en que nos proporciona además del Gasto de Diseño, la Avenida correspondiente. En Cuencas pequeñas ésto es importante, ya que un Hidrograma Triangular (Resultante si usamos el Método de Chow) no nos dá la información exacta del volumen de escurrimiento ni la rapidez con que se presentará el Gasto de Pico.

- Los Métodos Empíricos no nos sirven para determinar Gastos de Diseño ni Avenidas Máximas, ya que son formulados a partir del estudio y medición en cuencas particulares, y por ende, serían aplicables sólo a otras que tuvieran características muy similares.

- El Método de la Regionalización de Gumbel ó método de la Estación-Año, puede ser una ayuda muy valiosa para calcular una Avenida de Diseño en una cuenca en la que no se tenga información climatológica ni hidrométrica, ya que considera muy factible la utilización de información fuera del área en estudio pero con condiciones climatológicas y de escurrimiento similares a la que interesa. Sin embargo, ésta similitud no es de ninguna manera comprobable y por ello es que debe tenerse cierto recelo de los resultados que se obtengan en la aplicación del citado método.

- Como conclusión final se recomienda que, de ser posible, se utilicen los métodos de Hidrograma Unitario Curva 'S' e Hidrograma Unitario Instantáneo como los más confiables para el Diseño de cualquier Obra Hidráulica, ya que consideran todas y cada una de las características y condiciones de la cuenca para la obtención del Hidrograma de la Avenida de Diseño.