

6.1 La Curva de Descarga

Para llegar a conocer los recursos hidráulicos de una cuenca es necesario averiguar el caudal, diariamente, a la misma hora, y durante el mayor número posible de años. Así es como se llega a conocer el régimen de los ríos. Todos los países cuidan de organizar este servicio, estableciendo estaciones de aforo y publicando los resultados. En el Perú esta labor la realiza principalmente Senamhi.

Los términos caudal, gasto y descarga son sinónimos. Aforar significa medir caudales. El principal método para aforar corrientes naturales es el del correntómetro, el cual es descrito en el apartado siguiente.

Después de seleccionar adecuadamente la sección del río, se establece la sección de aforo y se procede a medir diariamente el caudal; también se mide el nivel. Luego de un tiempo es posible dibujar la curva de descarga del río en el lugar de la estación. Es una curva de caudales versus niveles o alturas de agua. Se usa en proyectos.

Los niveles se miden con limnímetros o limnígrafos instalados a un costado de la estación de aforo.

Dibujada la curva de descarga pueden suspenderse los aforos directos, pues bastará entonces con medir el nivel para conocer el caudal. Se recomienda revisar periódicamente la curva de descarga con mediciones directas de caudal.

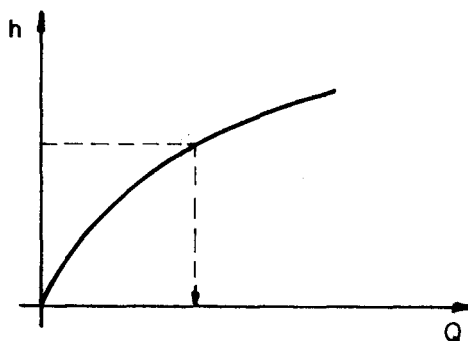


FIG. 6.1 CURVA DE DESCARGA

6.2 Medición de Caudales

De los varios métodos disponibles para aforar corrientes naturales el principal es con correntómetro. De estos aparatos hay dos tipos, de hélice y de rueda de copas. Instalar el correntómetro significa ubicar la hélice en el punto (P) donde se va a medir la velocidad del agua. Tomar lectura significa anotar el número de revoluciones (R) de la hélice en el tiempo arbitrario (t) en segundos. El fabricante proporciona para cada hélice la fórmula de calibración:

$$v = a n + b$$

v ... velocidad en el punto

n ... número de revoluciones por segundo = $\frac{R}{T}$

a,b ... constantes de calibración.

Para iniciar un aforo es necesario dividir la sección transversal (área mojada) en franjas, como indica la figura 6.2, usando verticales.

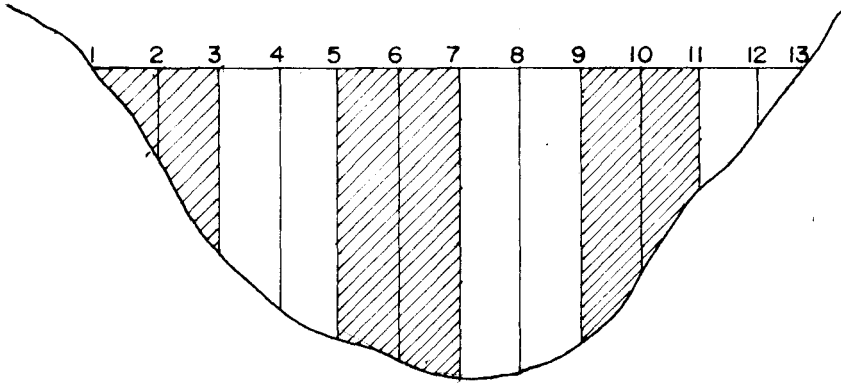


FIG. 6.2 DIVISION DE LA SECCION EN FRANJAS

El área de cada franja se asimila a un rectángulo de igual ancho y altura igual al promedio de las alturas de las 3 verticales que definen la franja.

La idea es medir el caudal en cada franja (ΔQ) y luego obtener el caudal total por sumatoria ($Q = \Sigma \Delta Q$).

El caudal en una franja es igual a la velocidad media en la franja multiplicada por el área. Se toma como velocidad media en la franja la velocidad media en la vertical. Y esta última se define en función de la velocidad puntual medida con el correntómetro, según el siguiente argumento (figura 6.3).

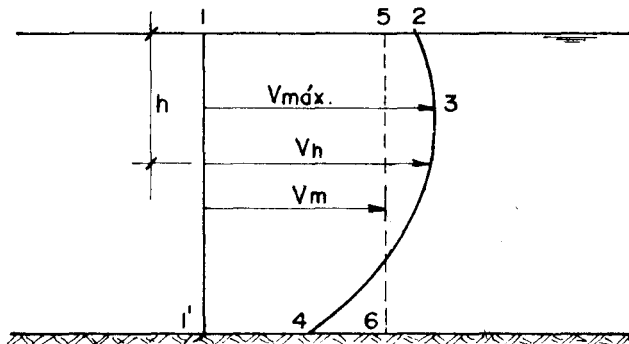


FIG. 6.3 DIAGRAMA DE VELOCIDADES

En la vertical 1-1 el diagrama de velocidades es una curva logarítmica, con velocidad máxima más o menos a un quinto del tirante a partir de la superficie. La velocidad media es tal que el área del rectángulo 1-5-6-1' es igual al área real 1-2-3-4-1'. Como reglas prácticas para obtener la velocidad media en la vertical (v_m) se usan las siguientes (figura 6.4).

$$v_m = 0.85 v_s$$

$$v_m = v_{0.6}$$

$$v_m = \frac{v_{0.2} + v_{0.8}}{2}$$

$$v_m = \frac{\sum v_i}{N}$$

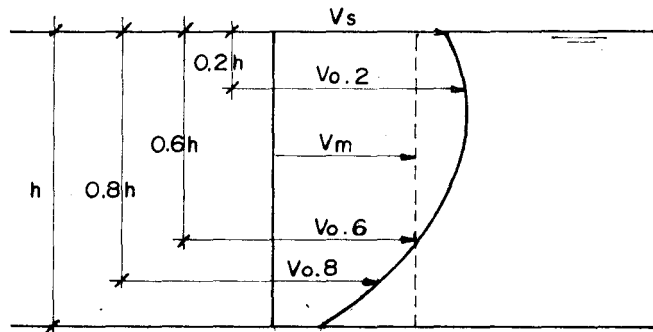


FIG. 6.4 VELOCIDADES TÍPICAS

Descripción del correntómetro (figura 6.5)

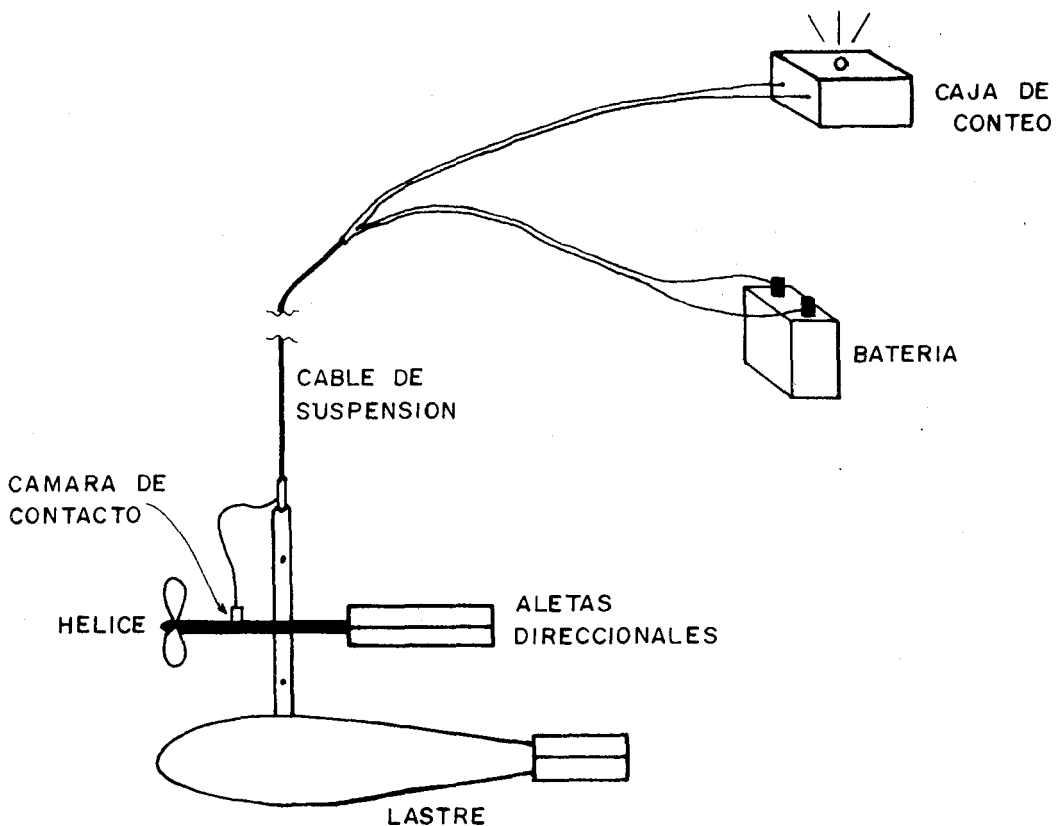


FIG. 6.5 CORRENTOMETRO

Según la magnitud de la corriente se hace trabajar el correntómetro sus-
pendido de un cable o sujeto a una barra que se hinca en el lecho. La
figura 6.5 corresponde a la primera modalidad.

El cable es para mantener el aparato suspendido desde un puente o una
oroya. El lastre es para impedir que sea sacado de posición por la
fuerza de la corriente. En el eje de la hélice hay una serie de finos
engranajes para poder contar el número de revoluciones. La pequeña cá-
mara de contacto hace el cambio de 10 revoluciones a una señal luminosa
y otra auditiva. De esta manera lo único que hace el operario es con-
tar el número de señales en un tiempo arbitrario, a fin de obtener n
(número de revoluciones por segundo) en cada puesta en estación del apa-
rato.

Las corrientes moderadas son vadeables. En ese caso se usa la barra,
debiendo el operario hacerse a un lado a fin de no interrumpir la co-
rriente que va a ser registrada.

Ejemplo 6.1 (tabla 6.1)

TABLA 6.1 REGISTRO DE AFORO CON CORRENTÓMETRO

PUNTO	SONDA		CORRENTOMETRO				VELOCIDAD		SECCION			Caudal ΔQ
	Dist. al origen	Prof.	Prof. de observación		R	t	En el punto	En la vertic.	Ancho	Prof. media	Área ΔA	
			método	m								
1	0.30	0.12	orilla	agua margen derecha								
2	0.65	0.43	0.2	0.09	10	67	0.109					
			0.8	0.34	5	50	0.077	0.093	0.70	0.407	0.285	0.027
3	1.00	0.67										
4	1.40	0.80	85%	0	35	60	0.398	0.338	0.80	0.807	0.646	0.218
5	1.80	0.95										
6	2.20	1.08	0.6	0.65	20	40	0.339	0.339	0.80	1.063	0.850	0.288
7	2.60	1.16										
8	3.00	1.15		0	25	48	0.360					
				0.25	30	53	0.387					
				0.45	25	46	0.376					
				0.65	25	51	0.340	0.332	0.80	1.15	0.920	0.305
				0.85	20	47	0.294					
				1.05	20	59	0.234					
9	3.40	1.14										
10	3.80	0.93	0.6	0.56	15	42	0.251	0.251	0.80	0.817	0.654	0.164
11	4.20	0.38										
12	4.45	0.65	0.6	0.39	10	44	0.160	0.160	0.50	0.417	0.203	0.032
13	4.70	0.22	orilla	agua margen izquierda								

$$A = \Sigma \Delta A = 3.558 \text{ m}^2$$

$$Q = \Sigma \Delta Q = 1.034 \text{ m}^3/\text{seg}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 0.29 \text{ m/seg}$$

Unidades

La unidad básica de flujo es el m^3/seg . El volumen de flujo se puede expresar en m^3 , pero como esto lleva a números demasiado grandes se acostumbra expresar en miles de m^3 (m MC) o en millones de m^3 (MMC). Los caudales pueden expresarse también en $m^3/\text{seg}/\text{km}^2$, para comparar casos de flujo en ríos con áreas tributarias diferentes, y son iguales al caudal en m^3/seg dividido entre el área de drenaje en km^2 .

El mm es la cantidad de agua necesaria para cubrir el área de drenaje con una profundidad de un milímetro; es una unidad de volumen bastante útil para comparar caudales con la precipitación que ha sido la causa.

Caudales medios

En época de caudales estables sólo es necesario determinar el caudal (m^3/seg) una vez al día, siempre a la misma hora. Ese valor es considerado el caudal medio diario. En época de variación de caudales es necesario determinar el caudal dos o tres veces al día a fin de obtener el caudal medio diario. Ahora, el promedio mensual de las descargas medias diarias proporciona la descarga media mensual y el promedio de éstas la descarga media anual.

Hidrogramas

Reciben el nombre de hidrogramas los gráficos Q-t, en general. Un hidrograma de creciente es el hidrograma que corresponde a una crecida aislada del río por efecto de una tormenta importante en la cuenca colectora (figura 6.6).

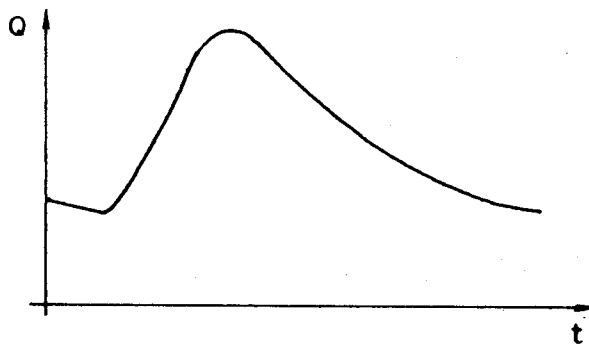


FIG. 6.6 HIDROGRAMA DE CRECIENTE

En cuanto a las unidades, éstas dependen del tamaño de la cuenca, pudiendo emplearse m^3/seg y minutos u horas para las hoyas más pequeñas, hasta miles de m^3/seg y horas o días para las hoyas más grandes.

Régimen de los ríos

El régimen de un río se refiere a la forma cómo se distribuyen los caudales medios mensuales a lo largo del año. Puede considerarse el año calendario o el año hidrológico. La figura 6.7 muestra el régimen general de los ríos del Perú de la vertiente del Pacífico. Se observa que hay una época de estiaje o de caudales mínimos, otra de caudales intermedios y una tercera de caudales máximos.

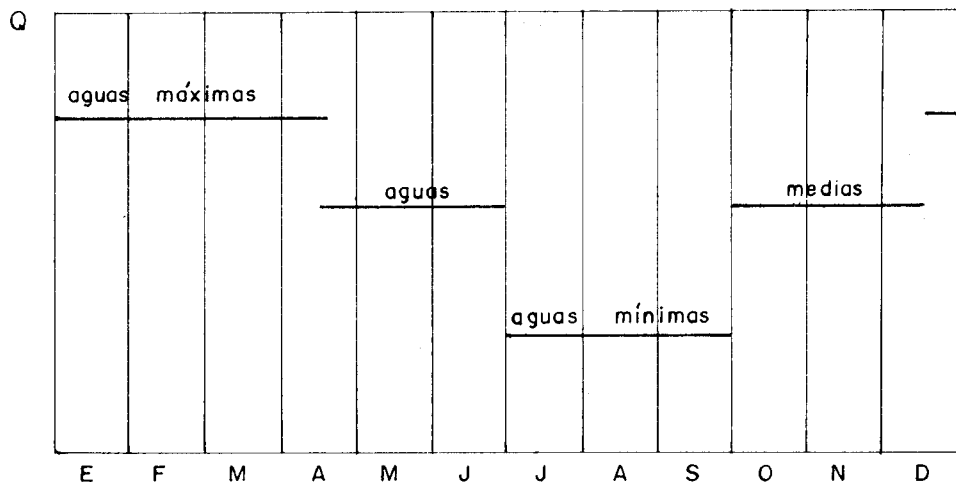


FIG. 6.7 REGIMEN DE LOS RIOS PERUANOS DEL PACIFICO

6.3 Curva de Descarga de Corrientes sin Aforar

El método para dibujar la curva de descarga de una corriente sin aforar se basa en la aplicación de la fórmula de Manning para determinar la ca pacidad de conducción del cauce.

Para aplicar el método se requieren los siguientes trabajos de campo:

- selección de la sección de interés;
- levantamiento de la sección transversal;
- determinación de la pendiente media del fondo del cauce;
- elección de un valor del coeficiente de rugosidad n , de la tabla 7.7

Cuando por razones económicas no es posible tomar medidas detalladas en el campo, la construcción de la curva puede hacerse a partir de un plano a curvas de nivel, tal como se indica a continuación mediante un ejemplo.

Ejemplo 6.2

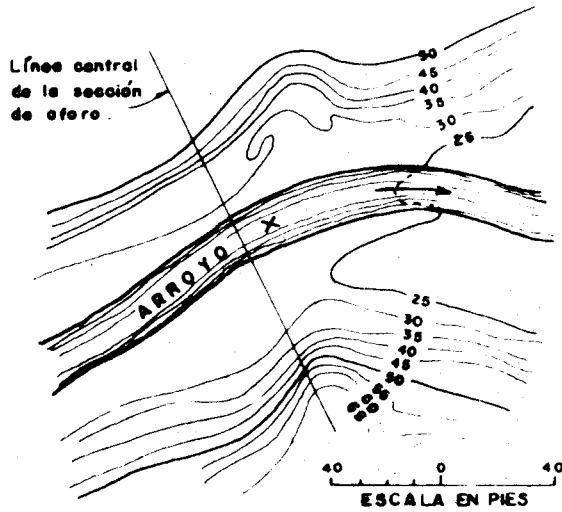
Primero se localizó en el plano la sección que va a constituir la sección de aforo, como se muestra en (A) de la figura 6.8. Luego se obtuvo la sección transversal mostrada en (B) tomando a escala las distancias entre las curvas de nivel. La pendiente media de la corriente se obtuvo de medidas tomadas a escala del plano a curvas de nivel. Se eligió un valor $n = 0.030$, basándose en diferentes descripciones y observaciones en el campo. Los cálculos se ejecutaron como se muestra en la tabla 6.2.

TABLA 6.2

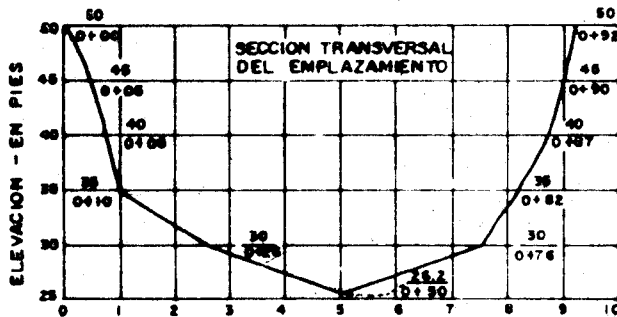
$n = 0.030$

$S = 0.00395$

Cota	ΔA	A	ΔP	P	R	Q
26.2		0		0		
30	95.0	95.0	50.58	50.58	1.88	450.5
35	305.0	400.0	24.57	75.15	5.33	3,799.6
40	377.5	777.5	12.46	87.61	8.87	10,371.6
45	410.0	1,187.5	11.66	99.27	11.96	19,333.8
50	442.5	1,630.0	12.46	111.73	14.59	30,298.5



(A)



(B)

FIG. 6.8 DATOS DEL EJEMPLO 6.2

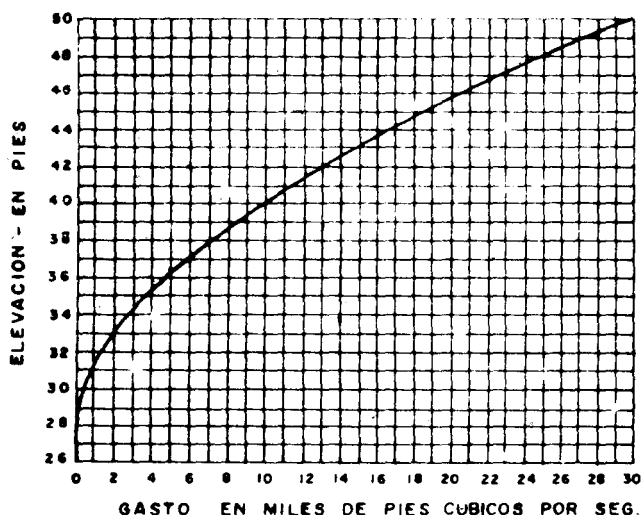


FIG. 6.9 CURVA DE DESCARGA DEL EJEMPLO 6.2

6.4 Análisis de la Información Hidrométrica

Al igual que los registros pluviométricos (apartado 2.3.2), los registros de caudales deben ser analizados en su consistencia antes de utilizarlos en cualquier estudio. Las inconsistencias pueden deberse a uno o más de los siguientes fenómenos: cambio en el método de recolección de la información, cambio en la ubicación de la sección de aforo, cambio en el almacenamiento superficial, cambio en el uso del agua en la cuenca.

Estas inconsistencias pueden detectarse mediante curvas doble másicas, en forma similar al caso de precipitaciones. En esta ocasión, para construir el patrón se convierten los caudales en magnitudes que sean comparables (gastos por unidad de área, escorrentía en mm o en porcentaje del gasto medio). Se supone que el patrón, al estar formado por varias estaciones, es confiable, es decir que no está afectado por posibles inconsistencias en alguna de las estaciones que lo forman, y por lo tanto cualquier quiebre en una curva doble másica se deberá a la estación en estudio.

Lo primero que se recomienda hacer cuando se detecta un quiebre es determinar si el quiebre es significativo o no. En la referencia 7 se consigna un método expeditivo para evaluar el nivel de significancia de un quiebre en una curva doble másica.

La curva doble másica no debe utilizarse para corregir datos de caudales. La corrección o ajuste debe hacerse analizando las posibles causas de la inconsistencia. Si el quiebre se debe a datos traducidos con una curva de descarga mal calculada, una retraducción de la información puede eliminar el quiebre. Si la inconsistencia se debe a extracciones hacia otras cuencas, aguas arriba de la sección en estudio, el agregar los caudales extraídos puede solucionar el problema. Si una inconsistencia bastante significativa se debe a cambios considerables en el uso

de la tierra, se recomienda utilizar solamente los registros que representan las condiciones actuales y extenderlos en base a correlaciones.

6.5 La Curva de Duración

La curva de duración, llamada también curva de persistencia, es una curva que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Para dibujarla, los gastos medios diarios, semanales o mensuales, se ordenan de acuerdo a su magnitud y luego se calcula el porcentaje de tiempo durante el cual ellos fueron igualados o excedidos (figura 6.10). Así el caudal de persistencia 75% es el caudal que es igualado o excedido el 75% del tiempo, por ejemplo, 9 de los 12 meses del año. ↗

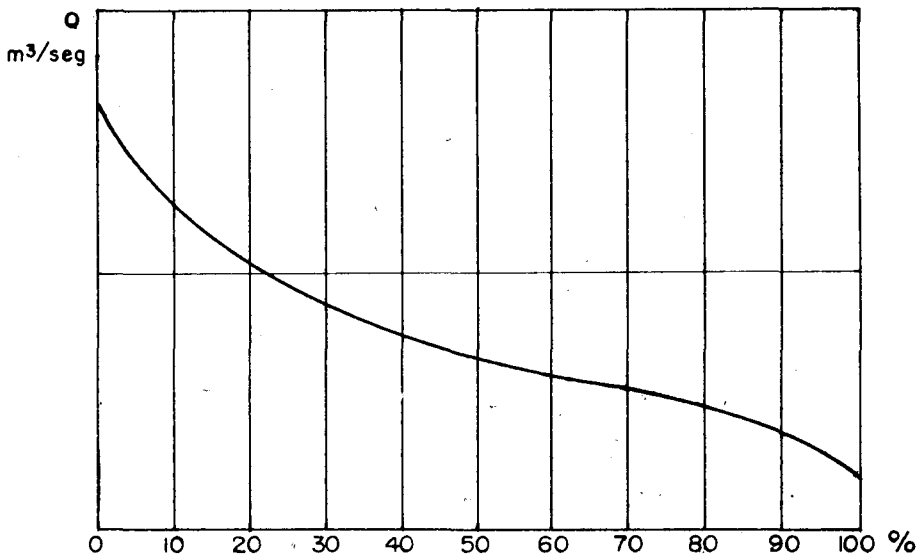


FIG. 6.10 CURVA DE DURACION

Las curvas de duración permiten estudiar las características de escurrimiento de los ríos. Su principal defecto como herramienta de diseño es que no presenta el escurrimiento en secuencia natural; no es posible decir si los caudales más bajos escurrieron en períodos consecutivos o fueron distribuidos a lo largo del registro. Las curvas de duración son más útiles para estudios preliminares y para comparaciones entre corrientes.

La figura 6.11 compara las curvas de duración de dos corrientes, P y R. El río P tiene características mucho más estables de escurrimiento; el río R no permite ninguna derivación permanente, en cambio el río P puede proporcionar como mínimo 10 m³/seg para derivación directa. Para ambas corrientes sería necesario el almacenamiento para satisfacer una demanda de por ejemplo 15 m³/seg, pero el volumen exigido por P (ABC) es mucho menor que para R (EBD). Por último, el río R produce un escurrimiento mucho más considerable que el P y con almacenamiento adecuado proporcionará un rendimiento mucho más alto. Sin embargo, las exigencias exactas de almacenamiento dependen de la secuencia efectiva del escurrimiento y no puede estimarse con precisión con las curvas de duración. Para eso se usa la curva masa, que es descrita en el apartado siguiente.

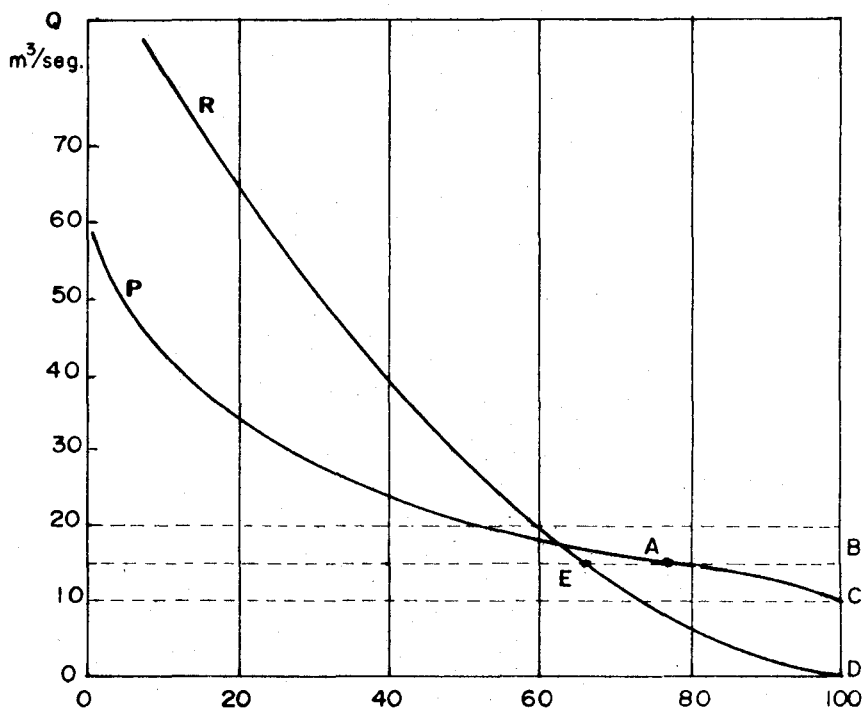


FIG. 6.11 COMPARACION DE DOS CORRIENTES

Construcción

El método de construcción de la curva de duración que se va a describir es el método del año calendario. Se ordenan los caudales medios mensuales para cada año en forma decreciente y se les asigna un número de orden. Luego se promedian los caudales para un mismo número de orden. Por último se grafica: caudales en ordenadas y número de orden o probabilidad de excedencia en abscisas.

Nº de orden	1	2	3	...	10	11	12
Año							
1972	4.2	3.9	3.6			0.3	0.1
1973	13.8	13.7	13.3			0.2	0.1
1974	4.5	4.1	3.8			0.4	0.2
1975	12.8	10.6	9.9			0.5	0.3
⋮							
1987							
1988							
Promedio	15.7	12.2	11.6			0.4	0.2
%	8.3	16.7				91.7	100.0

6.6 La Curva Masa

La curva masa, llamada también curva de volúmenes acumulados, es una curva que se utiliza en el estudio de regularización de los ríos por medio de embalses. Proporciona el volumen acumulado que ha escurrido en una estación en función del tiempo, a partir de un origen arbitrario. Es por ello una curva siempre creciente, que contiene a lo más pequeños tramos horizontales o casi horizontales correspondientes a los meses se cos.

Supondremos, para los efectos de explicación, que se ha dibujado la curva masa para los tres años de mayor irregularidad dentro del tiempo de registros del río (figura 6.12). La idea es estar prevenidos en caso se presente más adelante un período crítico como éste.

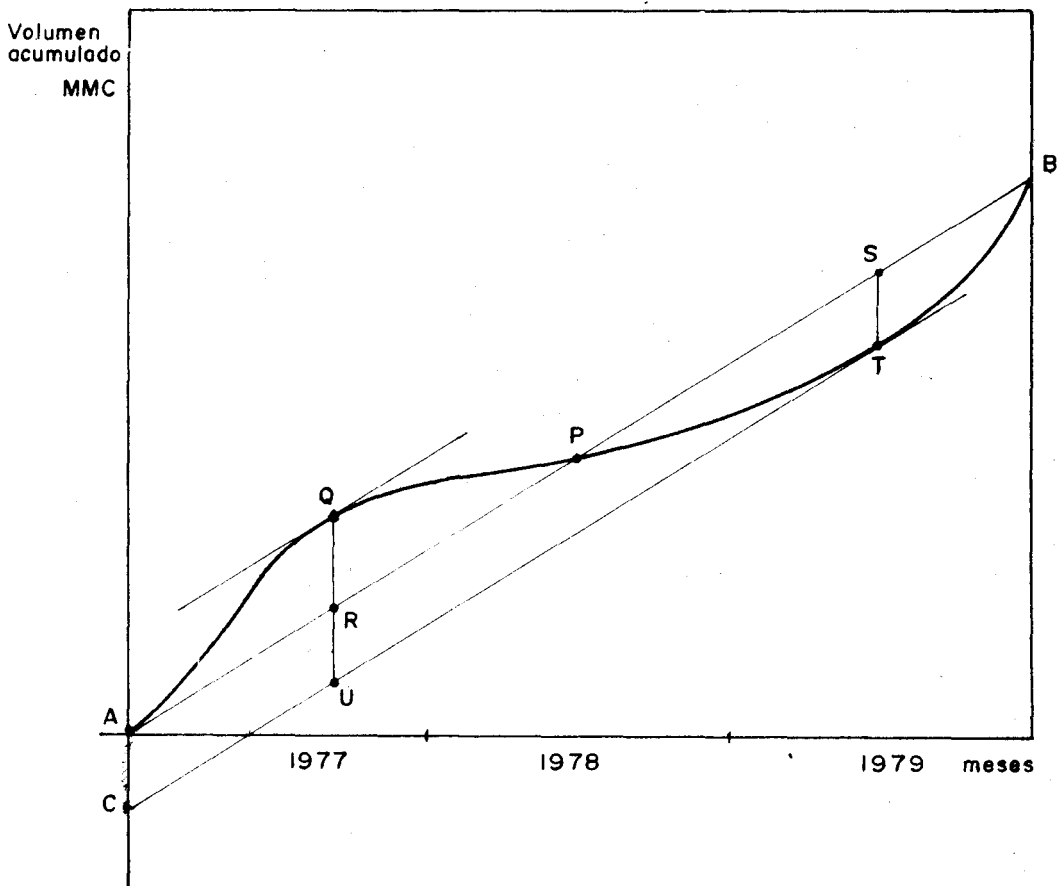


FIG. 6.12 LA CURVA MASA

Dibujada la curva se puede conocer:

- El volumen discurrido desde el inicio del período hasta una fecha dada.
- El volumen discurrido entre dos fechas.
- El caudal medio correspondiente a un intervalo $t_2 - t_1$, que viene a ser proporcional a la pendiente de la recta que une los puntos de curva de abscisas t_2, t_1 .
- El caudal en una fecha, que viene a ser proporcional a la pendiente de la recta tangente a la curva en el punto correspondiente.

e) El caudal medio correspondiente a todo el período (tangente trigonométrica de la recta AB).

Nos proponemos ahora analizar la curva masa a fin de determinar la capacidad que debe tener un embalse destinado a obtener un caudal regulado igual al caudal medio de todo el período.

Entre A y Q el caudal natural es mayor que el caudal regulado: hay un volumen disponible QR que se puede almacenar. Entre Q y P la relación se invierte, el caudal natural es ahora menor que el regulado: tiene que hacerse uso del volumen QR almacenado. Un primer resumen entonces es que entre A y P se puede atender el caudal solicitado almacenando QR con agua del propio río.

Entre P y B, un análisis similar conduce a ver que para satisfacer el caudal solicitado hay necesidad de almacenar previamente un volumen ST y que esto hay que hacerlo antes que empiece a funcionar el embalse. Trazando por T una paralela a AB tendremos entonces:

- QU ... capacidad mínima del embalse
- AC ... volumen que hay que tener almacenado antes que empiece el período
- QR ... volumen que hay que almacenar durante el período
- En Q ... colmada la capacidad del reservorio
- En T ... reservorio vacío

El estudio efectuado se refiere al aprovechamiento máximo de las aguas del río, es decir a una regulación óptima. También se puede pensar en regular el río a un caudal menor que el caudal medio del período. La determinación del volumen que debe tener el embalse se hace mediante un análisis similar, pero ya no para la recta AB sino para una recta cuya pendiente corresponda al gasto por regular. Tal cosa se ha efectuado en la figura 6.13, donde se obtiene que para regular un caudal dado por la inclinación de la recta r se necesita un embalse de capacidad EF. Las líneas de demanda se trazan tangentes a la curva masa en los puntos más altos (M, N).

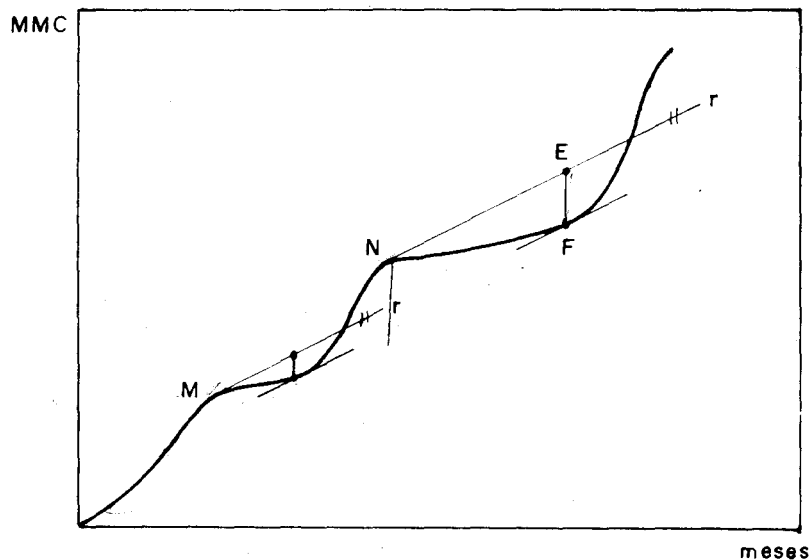


FIG. 6.13 CAPACIDAD DE EMBALSE

La curva masa también puede utilizarse para determinar el valor del caudal regulado que puede esperarse con una determinada capacidad del vaso (figura 6.14). En este caso las tangentes se trazan, siempre en los puntos altos de la curva masa (M, N) pero en una forma tal que su desviación máxima de la curva no exceda a la capacidad especificada del vaso (EF). La inclinación de la línea de demanda más plana es el caudal regulado.

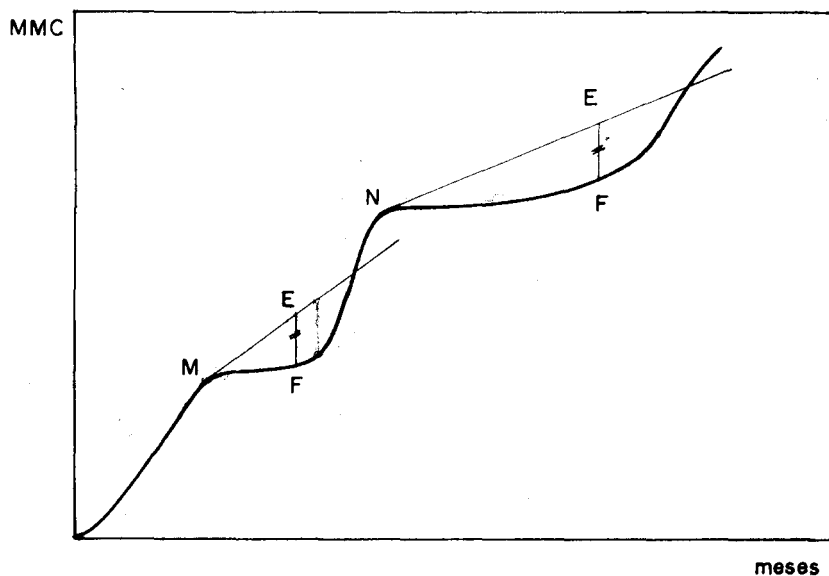


FIG. 6.14 CAUDAL REGULADO

6.7 Problemas

Problema 6.1

Calcule el caudal con la información dada en la tabla de abajo. Suponga que la calibración del medidor es de la forma $v = a + bn$, con $a = 0.1$ y $b = 2.2$ para v en pie/seg.

Distancia desde la orilla (pies)	Profundidad (pies)	Profundidad del correntómetro (pies)	Revoluciones	Tiempo (seg)
2	1	0.6	10	50
4	3.5	2.8	22	55
6	5.2	0.7	35	52
		4.2	28	53
9	6.3	1.0	40	58
		5.0	32	58
11	4.4	1.3	45	60
		3.5	28	45
13	2.2	0.9	33	46
		1.3	22	50
15	0.8	0.5	12	49
17	0			

Problema 6.2

A continuación se presentan las descargas medias diarias en metros cúbicos por segundo en una estación de medición para un período de 5 días. ¿Cuál es el caudal medio para el período en metros cúbicos por segundo? ¿Cuál es el volumen total durante el período en metros cúbicos? Si el área tributaria es de 100,000 km², ¿cuál es la lámina de escorrentía equivalente en mm?

Día	1	2	3	4	5
Caudal, m ³ /seg	700	4800	3100	2020	1310

Problema 6.3

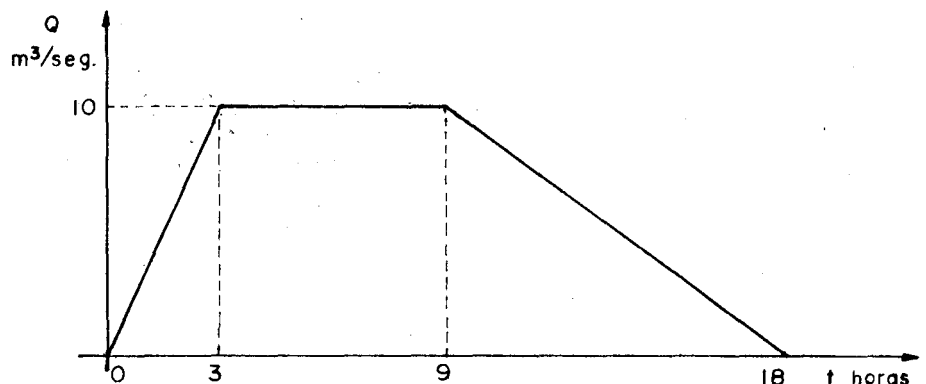
Dibujar la curva de duración para los datos de la tabla de abajo. Las cifras son caudales medios mensuales en m³/seg.

	Año 1	Año 2	Año 3
Enero	110	180	193
Febrero	102	118	109
Marzo	97	88	99
Abril	84	79	91
Mayo	70	56	82
Junio	62	52	74
Julio	45	47	68
Agosto	67	35	43
Setiembre	82	60	30
Octubre	134	75	48
Noviembre	205	98	49
Diciembre	142	127	63

Si se va a instalar una central hidroeléctrica en el sitio donde se han medido los caudales de la tabla, ¿cuál sería una primera estimación razonable del caudal de diseño y del volumen anual turbinado? ¿Cuál es el valor del caudal medio mensual con un período de retorno de 10 años?

Problema 6.4

La figura representa un hidrograma simplificado. Calcular y dibujar la curva masa.



Problema 6.5

Una corriente proporciona los siguientes volúmenes en un período de 80 días en el lugar de un posible reservorio. a) Dibujar la curva masa. b) Determinar los caudales medio, máximo y mínimo. c) ¿Qué capacidad de reservorio se necesita para asegurar un caudal regulado igual al caudal medio del período si el reservorio arranca el período estando lleno?. d) ¿Qué cantidad de agua se perdería en este caso por el aliviadero de demasías del embalse?.

Día	Volumen $\times 10^6 \text{ m}^3$	Día	Volumen $\times 10^6 \text{ m}^3$	Día	Volumen $\times 10^6 \text{ m}^3$
0	0	28	0.7	56	0.6
2	2.0	30	0.8	58	1.2
4	3.2	32	0.8	60	1.4
6	2.3	34	0.7	62	1.8
8	2.1	36	0.7	64	2.0
10	1.8	38	0.5	66	2.3
12	2.2	40	0.4	68	3.2
14	0.9	42	0.7	70	3.4
16	0.5	44	0.8	72	3.5
18	0.3	46	0.4	74	3.7
20	0.7	48	0.3	76	2.8
22	0.7	50	0.2	78	2.4
24	0.6	52	0.2	80	2.0
26	1.2	54	0.4		

viene de la página 98

G. PERIODO DE RACIONALIZACION (1,930 - 1,950)

Durante este período emergieron grandes hidrólogos que usaron el análisis racional en vez del empirismo para resolver problemas hidrológicos. En 1932, Sherman hizo un significativo avance en el pensamiento hidrológico al demostrar el uso del hidrograma unitario para trasladar el exceso de lluvia en hidrograma de escorrentía. En 1933, Horton inició la aproximación más exitosa hasta hoy día en el problema de determinar el exceso de lluvia sobre la base de la teoría de la infiltración. En 1935, Theis introdujo la teoría del no equilibrio que revolucionó el concepto de la hidráulica de pozos. En 1941, Gumbel propuso el uso de la distribución de valores extremos para el análisis de frecuencia de datos hidrológicos; él y otros muchos revitalizaron el uso de la estadística en hidrología iniciado por Hazen.

Un notable desarrollo en este período fue el establecimiento de muchos laboratorios hidráulicos e hidrológicos en todo el mundo. En los Estados Unidos, se organizaron más agencias y se reorganizaron otras o sólo se cambiaron nombres a fin de reforzar sus actividades relativas a estudios del agua.

sigue en la página 200