

LA ECUACION FUNDAMENTAL DE LA HIDROLOGIA

La ecuación fundamental de la hidrología se basa en el principio de la conservación de la masa. (Amisial, Roger: Disponibilidad de Aguas Superficial, CIDIAT, Mérida). Su establecimiento se fundamenta en un procedimiento de contabilidad del agua para un sistema hidrológico dado, mediante el uso de la ecuación de continuidad. La forma más general de esta ecuación es la siguiente

$$\text{Entrada} \pm \text{cambio de almacenamiento} = \text{salida}$$

ó

$$I \pm \Delta S = O$$

La aplicación de esta ecuación en la hidrología requiere la selección de un período de referencia bien determinado y de un sistema hidrológico bien definido. Todos los términos que integran la ecuación deben referirse al mismo período de tiempo. La ecuación puede establecerse para un período horario, diario, mensual, anual y mayor.

La escala de tiempo se selecciona de acuerdo con el tipo de evento hidrológico que se desea analizar, por ejemplo crecidas máximas, cantidad de agua requerida para riego, etc., mientras que la escala de espacio se selecciona de acuerdo con la precisión exigida por la escala de tiempo.

Por otra parte, es necesario un buen conocimiento del sistema hidrológico bajo consideración, para poder escoger los procesos y elementos que deben constituir las entradas, salidas y almacenamientos del sistema. A continuación se presenta la descripción del sistema hidrológico general o ciclo hidrológico y la de un sistema hidrológico regional, el cual se considera más a menudo en la aplicación de la ecuación fundamental de la hidrología.

Ciclo hidrológico

La figura 1, es una representación esquemática de los procesos del sistema hidrológico general. Se puede suponer que el ciclo empieza con la evaporación del agua de los océanos. El vapor del agua que resulta de la evaporación es trasladado por las masas de aire en movimiento y puede enfriarse, condensar y formar nubes. Si las condiciones son favorables el proceso de condensación continúa y aumentan los núcleos hasta que alcancen una dimensión suficiente para precipitarse. Parte de esta precipitación puede evaporarse en la atmósfera antes de llegar a la superficie de la tierra. Una gran parte de la precipitación cae directamente sobre los océanos y otra parte cae en la tierra.

La precipitación que cae en la tierra, se distribuye en varias formas. Parte es interceptada por la vegetación, los edificios y otros objetos; esta agua interceptada puede evaporarse de nuevo hacia la atmósfera y parte puede deslizarse por los mismos objetos, hasta llegar a la tierra. Parte de la precipitación corre sobre la superficie del suelo hacia los ríos y lagos, mientras que otra parte es retenida por las depresiones en la superficie del suelo. Parte del agua caída en la superficie del suelo, se infiltra y se distribuye de la siguiente manera: una porción se queda cerca de la superficie del suelo constituyendo la humedad del suelo; ésta puede percolar hacia los depósitos subterráneos o volver a aparecer en la superficie, regresar a la atmósfera mediante los procesos de evaporación y de transpiración por las plantas. Una porción de las aguas infiltradas se mueve en las capas superficiales para luego reaparecer en la superficie del suelo o en el lecho del río en forma de escorrentía subsuperficial. Otra porción alcanza un embalse más o menos permanente de agua subterránea por percolación y reaparecerá después de largos intervalos de tiempo y a menudo en puntos muy distantes, en la forma de un

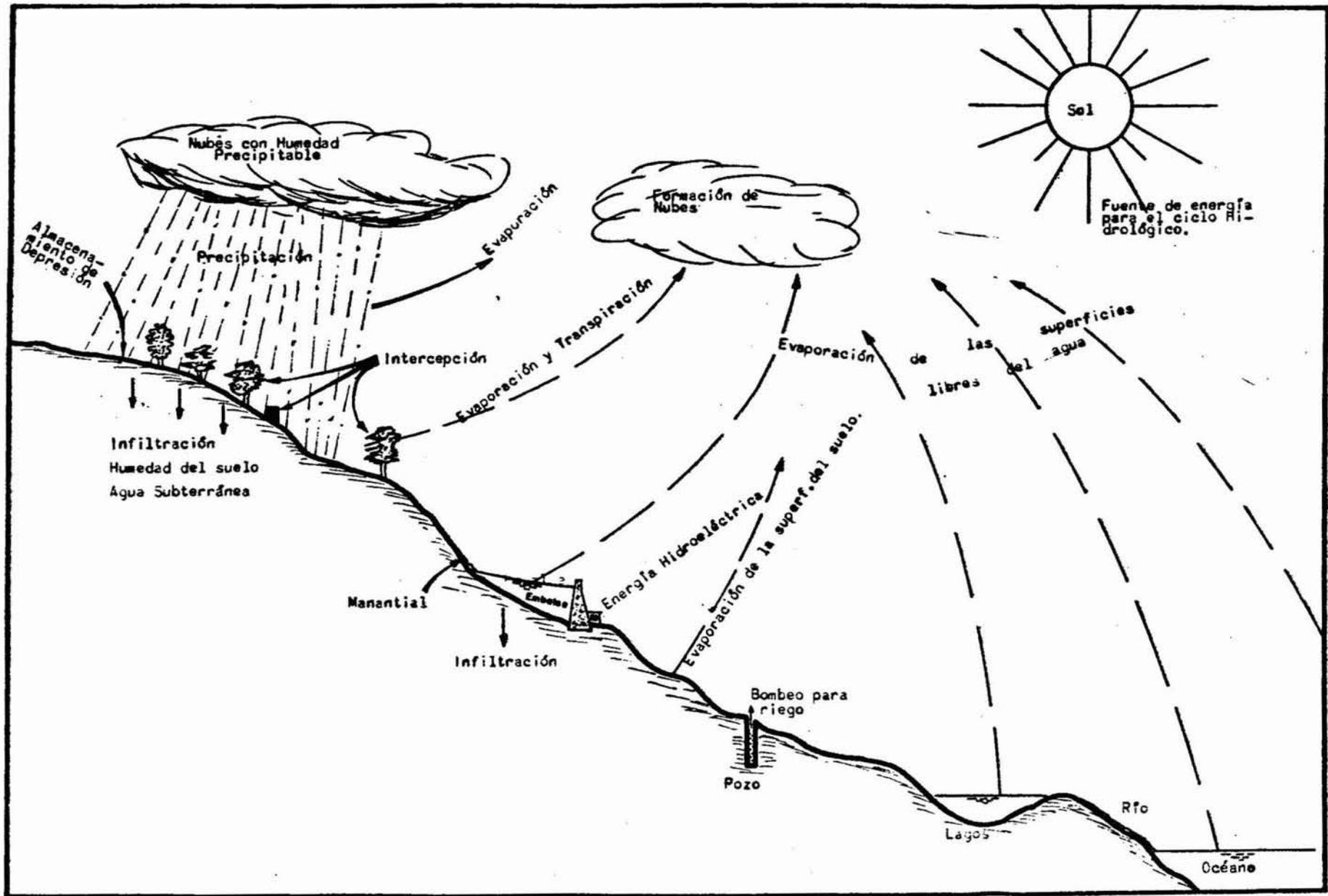


Figura 1. Ciclo hidrológico general.

surtidor, manando de un pozo artesiano o de un manantial.

Parte de la escorrentía de los ríos se puede desviar, mediante obras de derivación, para ser utilizada de inmediato con fines de abastecimiento de agua a las poblaciones, a las industrias, a la agricultura, a la producción de energía eléctrica, etc. Otra parte puede almacenarse temporalmente en embalses para la regulación de los caudales aguas abajo, con el fin de evitar los excesos y satisfacer las demandas de agua.

El agua almacenada en los depósitos subterráneos puede extraerse mediante bombeo o por simple gravedad y ser utilizada para satisfacer diferentes necesidades. Parte del agua se evapora de las superficies del suelo, de los lagos, de los ríos y de los pantanos. Parte de las aguas de los ríos, lagos y de los depósitos subterráneos fluyen a los mares y océanos reiniciando así todo el proceso.

La figura 2 muestra un flujograma del sistema hidrológico general. Los procesos del sistema están representados por flechas, y los almacenamientos por cuadros. Para considerar solamente una parte de este sistema general, se deben acortar las flechas correspondientes al almacenamiento o almacenamientos que se deseen analizar. Las flechas cortadas que corresponden a procesos determinados, constituyen las entradas y salidas al sistema, mientras que los almacenamientos aislados son los que se deben considerar en el establecimiento de la ecuación general de la hidrología.

Sistema hidrológico regional

El sistema hidrológico general o ciclo hidrológico se aplica a toda la tierra. En la mayoría de los casos, el analista está interesado en una región menos extensa y con límites bien definidos. Los límites pueden ser fisiográficos, siguiendo

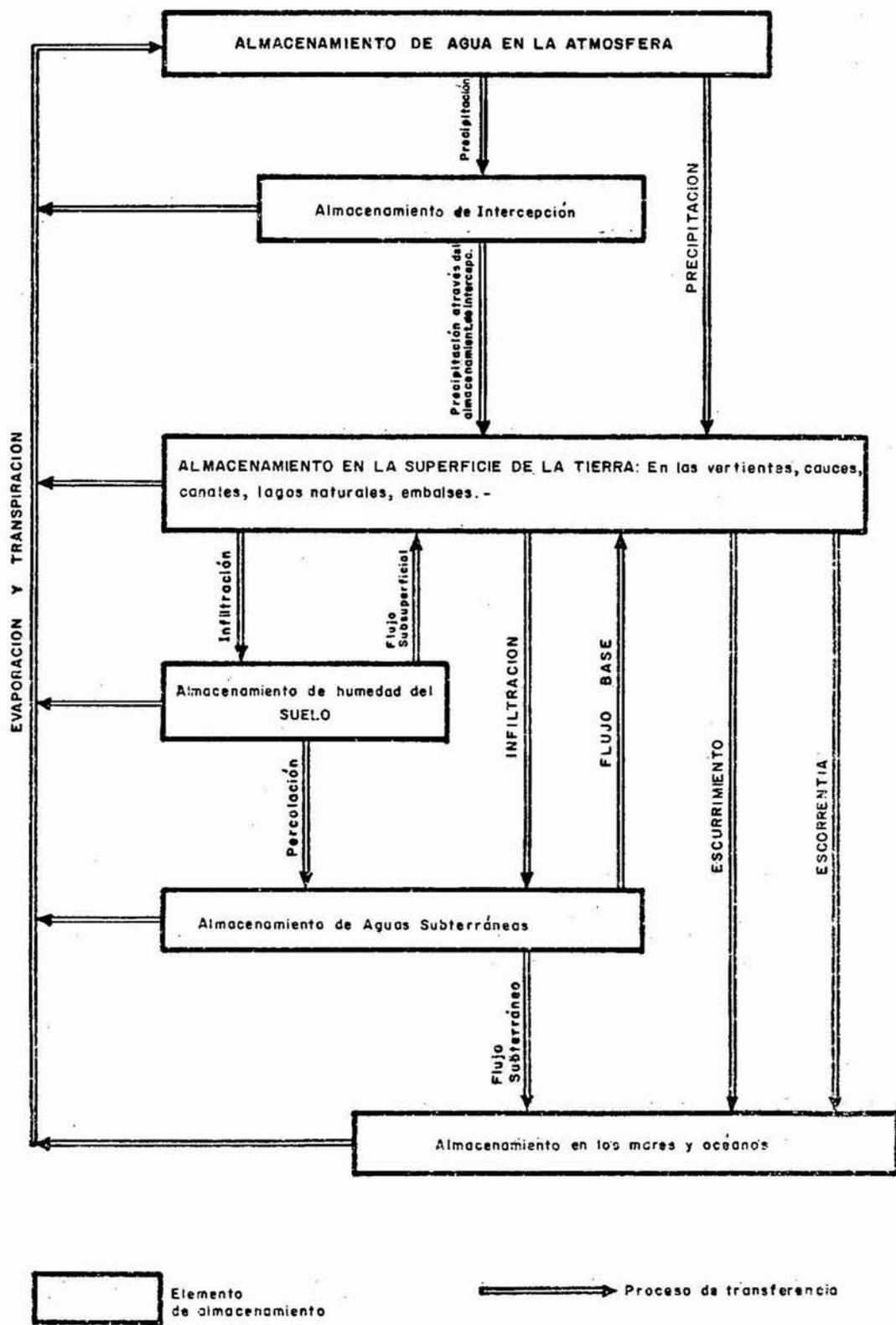


FIG.2 REPRESENTACIÓN ESQUEMATICA DEL SISTEMA HIDROLOGICO GENERAL

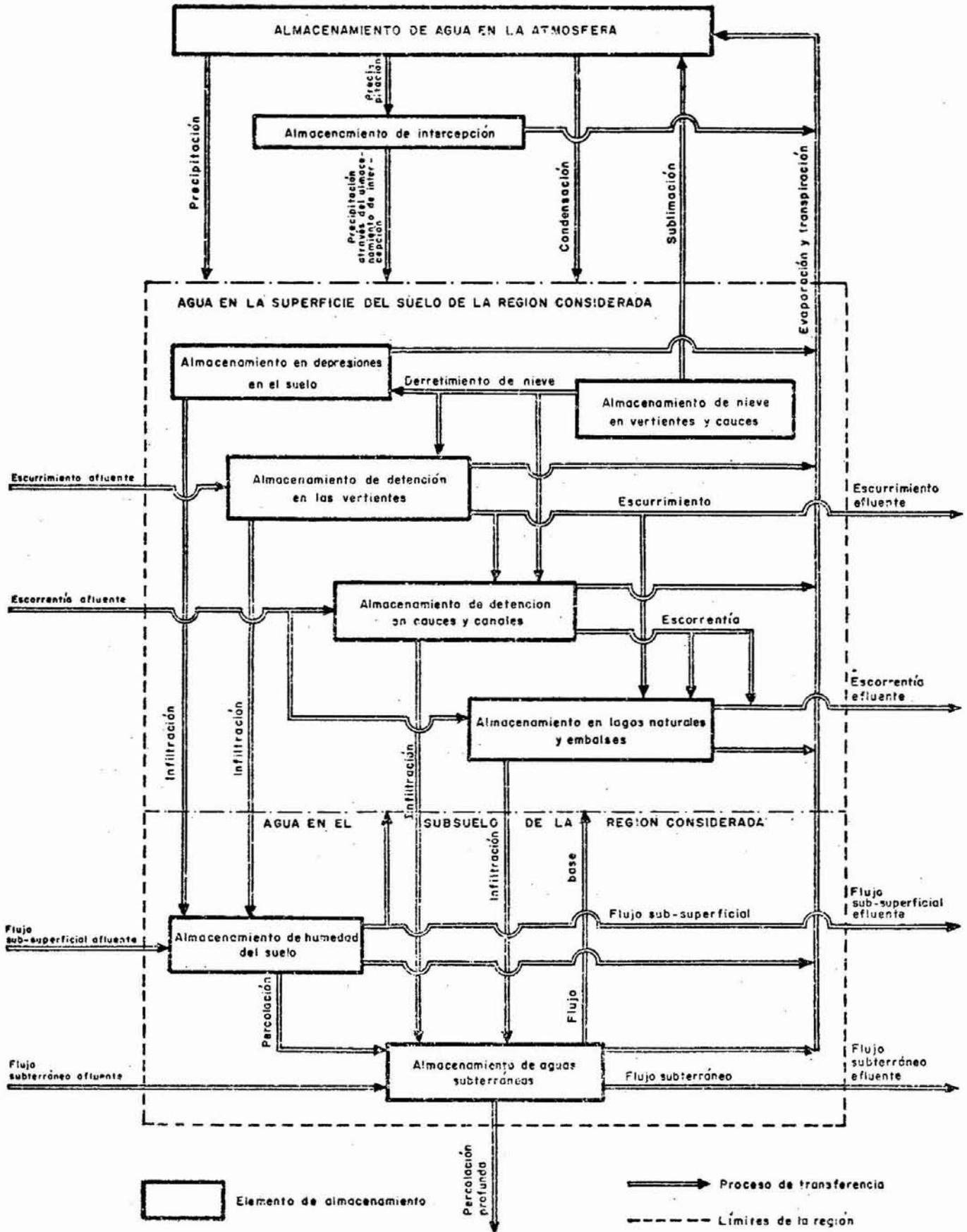


FIG. 3 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN SISTEMA HIDROLOGICO REGIONAL

las líneas de división de una cuenca hidrográfica, pueden ser políticos, o pueden coincidir con los límites de un área cultivada. El sistema hidrológico de tales regiones se presenta en la figura 3, con sus posibles entradas y salidas y los procesos internos que lo integran. Se puede ver que el sistema hidrológico es un sistema continuo, o sea, regido por el principio de la conservación de la masa. En otros términos, el sistema y sus salidas dan cuenta de todas las cantidades de agua que constituyen sus entradas.

Es obvio que el sistema hidrológico regional es un subsistema del sistema hidrológico general. También es posible que el analista considere el sistema hidrológico regional con otras salidas y entradas o solamente considere un subsistema o sea una parte del sistema hidrológico regional, de acuerdo con su objetivo, conocimiento de los procesos y los datos de que disponga.

Ejemplo: Balance hídrico de una región

Para hacer el balance hídrico completo de una región, considerando el agua total contenida tanto en su superficie como en el suelo y el subsuelo, se cortan de la manera que se muestra en la figura 3, los siguientes procesos de transferencia que constituyen las entradas y salidas del sistema:

Escorrentía afluente y/o efluente: En general es un valor medido o estimado.

Flujo subsuperficial afluente y/o efluente: Los límites de la región analizada se tratan de hacer coincidir con las líneas de divorcio de agua para que este valor sea cero.

Flujo subsuperficial afluente y/o efluente: Valor generalmente despreciable, sobre todo si los límites de la región

son bien seleccionados.

Flujo subterráneo afluente y/o efluente: Se trata de hacer que los límites de la región coincidan con las divisorias de agua, de otra manera sus valores deben ser estimados.

Precipitación: Es un valor medido que se extiende a toda la región mediante el uso del promedio aritmético, de los polígonos de Thiessen o de las curvas isoyetas.

Evapotranspiración: Estos valores pueden estimarse mediante fórmulas, medirse con evaporímetros o también estimarse usando la ecuación fundamental de la hidrología.

En cuanto a los elementos de almacenamiento, se miden los cambios de nivel observados durante el período de estudio y se transforman en volúmenes de agua

Para los elementos de almacenamiento superficial, el cambio de volumen es sencillamente igual al cambio de nivel por el área promedio del elemento.

Para el almacenamiento de humedad del suelo, el cambio de volumen se obtiene multiplicando la gravedad específica aparente del suelo, por su profundidad promedio; por la disminución de humedad durante el período y por el área correspondiente.

Para obtener el cambio de almacenamiento de aguas subterráneas, se multiplica el abatimiento del nivel freático, por el rendimiento específico promedio del acuífero y por su área.

Cuando los cambios de almacenamiento son difíciles de eva-

luar, se pueden seleccionar escalas de tiempo tales, que los valores del cambio de almacenamiento puedan desprejarse.

A continuación se da un ejemplo para calcular el uso consumtivo de un área con la siguiente información: (Milligan, C. Apuntes sobre conferencias de hidrología, CIDIAT, Mérida, Venezuela).

Area del proyecto = 10.000 hectáreas

Gasto afluente al área = 6 m³/seg. durante 150 días.

Gasto importando = 0,3 m³/seg. durante 150 días.

Escorrentía superficial al área = 0,0

Precipitación en el área durante el tiempo indicado = 20 cm.

Afluencia subterránea = 0,2 m³/seg. durante 150 días.

Efluencia superficial = 4,5 m³/seg. durante 150 días.

Exportación del área = 0,1 m³/seg. durante 150 días.

Escorrentía superficial efluente = 0,0

Efluencia subterránea = 0,1 m³/seg. durante 150 días.

Abatimiento del nivel freático durante el tiempo indicado =
= 1,5 mt.

Rendimiento específico del acuífero promedio = 9%

Profundidad del suelo = 2 mt.

Gravedad específica aparente (densidad volumétrica del
suelo) = 1.4

Porcentaje de disminución de humedad en el suelo durante el
período indicado = 6%.

No se tienen depósitos superficiales.

Afluencias:

Gasto afluente al área

$$\frac{6 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4 \text{ m}^2} = 777.6 \text{ m.}$$

Gasto importado

$$\frac{0.3 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4 \text{ m}^2} = 38.9 \text{ mm.}$$

Precipitación

$$= 200.0 \text{ mm}$$

Afluencia subterránea

$$\frac{0.2 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4 \text{ m}^2} = 25.9 \text{ mm}$$

$$\text{Afluencia total} = 1042.4 \text{ mm.}$$

Efluencias:

Efluencia superficial

$$\frac{4.5 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4 \text{ m}^2} = 583.2 \text{ mm.}$$

Exportación del área

$$\frac{0.1 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4 \text{ m}^2} = 12.9 \text{ mm.}$$

Efluencia subterránea

$$\frac{0.1 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ s} \times 150 \text{ d}}{10.000 \times 10^4} = 12.9 \text{ mm.}$$

$$\text{Efluencia total} = 609.0 \text{ mm} + U_c.$$

Cambios de almacenamiento:

Abatimiento del nivel freático

$$-1.5 \text{ m} \times 0.09 = -0.135 \text{ m} = -135 \text{ mm.}$$

Disminución de humedad en el suelo

$$-0.06 \times 1.4 \times 2 = -0.168 \text{ m} = -168 \text{ mm.}$$

$$\text{Almacenamiento} = -303 \text{ mm.}$$

Uso consuntivo (U_c):

$$U_c = \text{Afluencia} + \text{Almacenamiento} - \text{Efluencia}$$

$$= (1042.4 + 303 - 609) \text{ mm} = 736.4 \text{ mm.}$$

$$U_c = 736.4 \text{ mm}/150 \text{ d.}$$

$$U_c = 4.9 \text{ mm/d}$$

$$U_c = 0.0049 \text{ m} \times 10.000 \times 10^4 \text{ m}^2 = 49 \times 10^4 \text{ m}^3$$

Ejemplo: Determinación del requerimiento de agua para riego

Otro ejemplo donde puede aplicarse la ecuación general de la hidrología, es para determinar el requerimiento de agua para riego lo que corresponde a aislar en la figura 3 el elemento de almacenamiento denominado "Almacenamiento de humedad del suelo". El proceso de cálculo se muestra en la Tabla 1, el cual se explica a continuación:

- a) Precipitación media
- b) Evapotranspiración potencial: 80% de la evaporación de tina por el coeficiente de uso consuntivo.
- c) Evapotranspiración real: (ETR)

T A B L A 1
BALANCE HIDRICO

ESTACION: SAN NICOLAS

REQUERIMIENTO DE AGUA PARA RIEGO

M E S E S	J	J	A	S	O	N	D	E	F	M	A	M	ANUAL
a Precipitación "P" (mm)	289	257	185	147	163	101	36	10	32	14	141	228	1603
b Evapotranspiración Potencial "ETP"	98	99	111	123	117	118	127	152	162	198	136	121	1562
c P - ETP	191	158	74	24	46	-17	-91	-142	-130	-184	5	107	41
d Evapotranspiración Real "ETR" (mm)	98	99	111	123	117	118	119	10	32	14	136	121	1098
e Cambio en el almacenamiento de agua en el suelo	0	0	0	0	0	-17	-83	0	0	0	5	95	
f Reserva útil del suelo 100 mm.	100	100	100	100	100	83	0	0	0	0	5	100	
g Excedente (mm)	191	158	74	24	46	0	0	0	0	0	0	12	505
h Déficit Agrícola (mm)	0	0	0	0	0	0	8	142	130	184	0	0	464

12

$$\begin{array}{r} 98 \\ 100 \\ \hline 198 \end{array}$$

Si $P-ETR > 0$ $ETR = ETP$

Si $P-ETP < 0$

- i. si la reserva útil de humedad del suelo es mayor que $ETP-P$ entonces $ETR = ETP$
 - ii. Si la reserva útil de humedad de suelo (MS) es menos que $ETP-P$ entonces $ETR = P \div MS$
- e) El cambio en el almacenamiento del suelo: cada vez que $P-ETP < 0$ se extrae del suelo la humedad necesaria para que $ETR-ETP$ hasta agotarla. Una vez que ésta se ha agotado cuando $P > ETP$ el excedente de precipitación va primero a llenar el almacenamiento del suelo.
- f) Reserva útil del suelo: Inicialmente se supone que el suelo está a capacidad de campo y ésta se afecta del cálculo en (e).
- g) Excedente: el agua que no es usada por las plantas, ésto es que no va a ETR o al almacenaje del suelo. Esta agua se convierte en escurrimiento y percolación.
- h) Déficit agrícola: El agua necesaria para que siempre $ETR = ETP$.

En este procedimiento se ha asumido una distribución de las lluvias es en forma contínua a lo largo del tiempo lo que no es cierto. Como se sabe, la cantidad de agua infiltrada y la intercepción por ejemplo, son mayores cuando la precipitación se extiende en un período largo de tiempo, de otra forma, ésto es para la misma precipitación pero de corta duración el escurrimiento aumenta.

El resultado de este problema se muestra gráficamente en la figura 4.

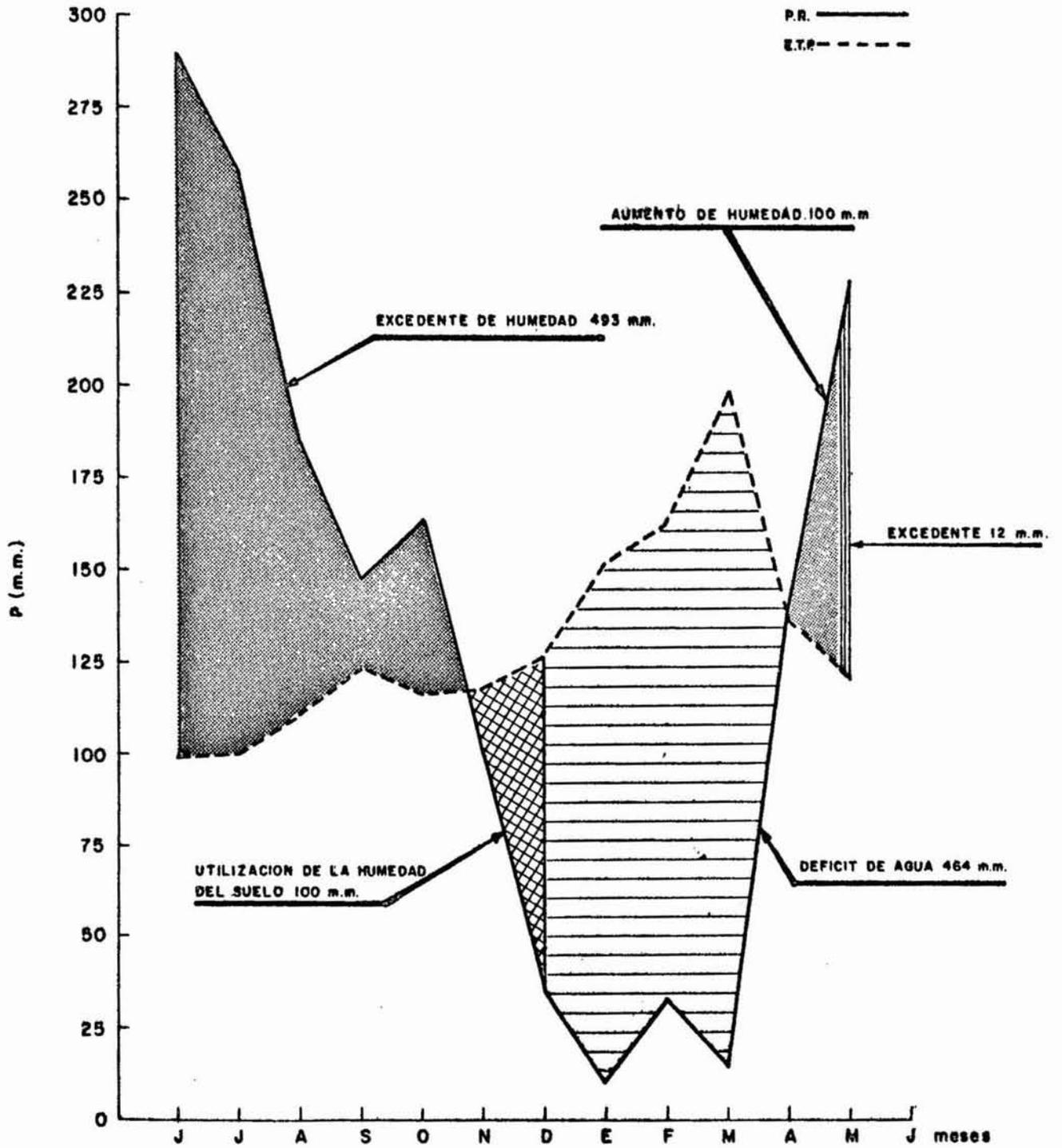


Figura 2. Contabilización de la deficiencia de humedad. Estación San Nicolas.

Ejemplo: Dimensionamiento de embalses

Las corrientes naturales tienen una distribución en el tiempo que en general se adapta a los requerimientos de la demanda. Este hecho crea la necesidad de construir depósitos de almacenamiento de agua que sirven principalmente para almacenar agua de las épocas de lluvia para usarlas en los momentos de mayor demanda. Igualmente los embalses sirven otros propósitos, como lo son el de disminuir los daños ocasionados por las crecidas o el aumentar la carga necesaria para una central hidroeléctrica.

El tema central de este ejemplo es cómo determinar la capacidad útil de almacenamiento de un embalse que debe cumplir propósitos de conservación. Debido a que la función primordial es proveer capacidad de almacenamiento, ésta se debe determinar de levantamientos topográficos, realizados en el sitio de embalse de la manera como sigue:

- a) Se determina el sitio de la presa y se mide el área encerrada por cada curva de nivel como se muestra en la Tabla de la figura 5a.
- b) Los incrementos de volumen (ΔV) que existen entre dos elevaciones se calculan multiplicando la diferencia de nivel, por la semisuma de las áreas comprendidas entre las curvas de nivel correspondiente, como se muestra en la tabla de la figura 5a. Esto es: el incremento de volumen entre las elevaciones 130 y 140 m. viene dado por:

$$\frac{1}{2} (140-130) \times \frac{0.8 \times 10^6 + 1.3 \times 10^6}{2} = 10.5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

- c) Los volúmenes de agua contenidos hasta una elevación del

embalse, se obtiene acumulando los valores obtenidos en el paso anterior.

- d) Estos valores se presentan generalmente en la forma de las curvas área-capacidad-elevación que se muestran en la figura 5c, las cuales se obtienen graficando áreas contra elevaciones y volúmenes contra elevaciones.

Los cálculos anteriores se hicieron suponiendo que existen datos topográficos. De no suceder así, se levantan perfiles transversales, y los volúmenes entre secciones se calculan mediante la fórmula del volumen del prisma.

Cuando la superficie libre del embalse no es horizontal, lo que sucede cuando la anchura del embalse es pequeña, la curva de remanso (M-1 ó S-1) se determina de acuerdo a la teoría de flujo en canales, y los volúmenes para cada elevación se determinan estableciendo secciones transversales en el embalse y calculando los volúmenes entre cada dos secciones. La forma exacta de la curva de remanso formada por la superficie de agua en el embalse también es útil para establecer las expropiaciones y determinar la reubicación de las obras existentes para el momento de la construcción

Determinación de la producción de agua en un embalse

En la mayor parte de los casos los embalses se construyen con la finalidad de asegurar un suministro continuo de agua. La producción de agua de un embalse durante la etapa más crítica se denomina producción segura o firme, mientras que su producción durante períodos no críticos se denomina producción secundaria, y puede usarse con fines distintos al fin prioritario para el cual fue construido el embalse.

Existen dos tipos de problemas en la determinación de la producción de agua de un embalse, el primero es cuando se conoce la afluencia y efluencia del embalse y se desea determinar la capacidad necesaria y el otro es: conocida la afluencia al embalse y su capacidad, determinar la efluencia (caudal seguro).

Para ilustrar mejor el procedimiento a seguir, se expone a continuación el siguiente problema: (Linsley Ray y Franzini Joseph: Water Resources Engineering, 2a. ed. Mc.Graw-Hill, New York, 1972): Determinar la capacidad necesaria de un tanque de compensación para suplir agua a una ciudad según un determinado esquema si el agua se extrae de un campo de bombeo:

- a) bombeando agua a intensidad constante durante las 24 horas del día;
- b) bombeando agua a intensidad constante de 8 am. a 5 pm.

La solución del problema se muestra en la Tabla 2. Para el caso a) la capacidad de la bomba es de $2400/24 = 100 \text{ m}^3/\text{hora}$ y el volumen del depósito es de 402 m^3 mientras que para el caso b) la capacidad del depósito es de $2400/9 \cong 267 \text{ m}^3/\text{hora.}$, y el volumen del depósito es de 1290 m^3 .

Estudios de operación de embalses: El proceso de determinación de la capacidad necesaria para que un embalse fluvial produzca cierto caudal seguro, es en esencial similar al problema anterior. El proceso de análisis se denomina estudio de operación porque consiste en simular la forma en que trabajará el embalse de acuerdo a un conjunto de reglas previamente establecidas.

La escala de tiempo a usarse para un estudio de operación, depende de la relación existente entre la capacidad total del

TABLA 2: Determinación de la Capacidad de un tanque de compensación

ESQUEMA DE DEMANDA		PARA 24 HORAS DE BOMBEO			PARA 9 HORAS DE BOMBEO		
Hora terminada a las	Demanda m ³	Rata de bombeo m ³ /hora	Agua a suplir por depósito m ³	Agua almacenada en el depósito m ³	Rata de bombeo m ³ /hora	Agua a suplir por depósito m ³	Agua almacenada en el depósito m ³
1:00 am	52	100	0	48	0	52	0
2:00 am	46	100	0	54	0	46	0
3:00 am	43	100	0	57	0	43	0
4:00 am	41	100	0	59	0	41	0
5:00 am	43	100	0	57	0	43	0
6:00 am	51	100	0	49	0	51	0
7:00 am	61	100	0	39	0	61	0
8:00 am	91	100	0	9	0	91	0
9:00 am	118	100	18	0	266	0	148
10:00 am	126	100	26	0	267	0	141
11:00 am	128	100	28	0	267	0	139
12:00 m	126	100	26	0	267	0	141
1:00 pm	124	100	24	0	267	0	143
2:00 pm	122	100	22	0	267	0	145
3:00 pm	122	100	22	0	267	0	145
4:00 pm	121	100	21	0	266	0	145
5:00 pm	123	100	23	0	266	0	143
6:00 pm	128	100	28	0	266	128	0
7:00 pm	135	100	35	0	0	135	0
8:00 pm	140	100	40	0	0	140	0
9:00 pm	139	100	39	0	0	139	0
10:00 pm	133	100	33	0	0	133	0
11:00 pm	117	100	17	0	0	117	0
12:00 am	70	100	0	30	0	70	0
TOTAL	2400	2400	402	402	2400	1290	1290

embalse y su caudal afluente y puede ser horario, diario, mensual, etc. El registro a usarse debe corresponder al período o conjunto de períodos más críticos.

Los registros a usarse, al menos que existan valores disponibles en el sitio del embalse deben generarse. Aún en los casos que existan registros, éstos pueden ser cortos y no incluir los períodos más críticos, por lo que se necesita su extensión en el tiempo.

Hoy en día, se hace necesario en los casos que así lo justifiquen, generar mediante modelos de simulación períodos largos de registro y ejecutar el análisis de operación durante todo el período, usando computadoras electrónicas.

Una vez que los caudales en el sitio de embalse se han determinado, es necesario ajustarlos por las pérdidas que ocurren por evaporación desde el embalse, por la precipitación que cae al embalse, por la cantidad de agua que debe soltarse para satisfacer demandas por derechos adquiridos y también en caso de ser importante, por fugas que se produzcan por filtraciones del embalse.

Cuando las variaciones del nivel del embalse no involucran cambios grandes en el área de la superficie libre, las pérdidas por evaporación y las ganancias por precipitación para ajustar los caudales, se calculan en base a un área media, de la superficie libre, de otra forma se debe proceder por tanteo y error como se ilustra más adelante.

Si el caso del problema fuera determinar el caudal seguro, cuando la capacidad del embalse está fijada por condiciones topográficas, entonces el volumen de agua que el embalse puede producir durante el año, está dado por la suma de la capacidad

útil del embalse más el caudal afluente utilizable durante el período crítico.

Para ilustrar mejor los conceptos expuestos se presenta a continuación un problema donde se considera el área del embalse constante: (Linsley y Franzini op.cit).

En la Tabla 3 se dan los valores mensuales del caudal, evaporación de tina y ratas de demanda para un sitio propuesto de embalse. Los derechos adquiridos requieren de una cantidad de agua igual al caudal natural o a $0.15 \text{ m}^3/\text{seg}$. cualquiera que sea el menor. Asuma que el área del embalse es de 600 Ha. y que el coeficiente de escorrentía del área inundada es de 0.4. La relación entre la evaporación de lago y la evaporación de tina es 0.7. Cuál es la capacidad requerida por el embalse?. Si el año anterior fue semejante al presente, hay agua suficiente para satisfacer la demanda?

Para resolver el problema se usa el número de días real para cada mes y se usan 30 días como una aproximación para los derechos adquiridos. Después se calculan las siguientes columnas.:

$$\begin{aligned} \text{a) Derechos de agua: } & 0.15 \text{ m}^3/\text{s} \times 86400 \text{ seg/día} \times 30 = \\ & = 388.800 \text{ m}^3 = 389 \times 10^3 \text{ m}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 389 \times 10^3 \text{ m}^3 \text{ será la demanda en los meses que} \\ & Q > 389 \times 10^3 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{b) Evaporación (m}^3) &= (\text{EVT}) (\text{mm}) \times 10^{-3} \text{ m/mm} \times (600 \times 10^4 \text{ m}^2) \\ & \times 0.7 = \text{EVT} (\text{mm}) 4200 \\ \text{EV (10}^{-3} \text{ m}^3) &= 4,2 \text{ EVT} (\text{mm}) \end{aligned}$$

TABLA 3 : Datos de Caudal, Demanda, Evaporación y Precipitación para un sitio de Embalse.

M E S	CAUDAL MEDIO m ³ /s	DEMANDA 10 ³ m ³	EVAPORACION mm	PRECIPITACION mm
ENERO	3.03	1230	53	135
FEBRERO	2.68	1845	69	76
MARZO	3.68	2460	81	41
ABRIL	1.47	3690	91	25
MAYO	0.57	4428	140	5
JUNIO	0.25	4428	200	0
JULIO	0.08	4428	211	0
AGOSTO	0.14	4305	203	0
SEPTIEMBRE	0.71	4182	198	0
OCTUBRE	0.11	2460	154	0
NOVIEMBRE	2.69	2214	86	119
DICIEMBRE	2.92	1230	53	160

- c) Precipitación : coeficiente de escorrentía del área inundada = 0,4

$$\text{Prec. (10}^{-3} \text{ m}^3) = 0.6 \text{ PR (mm)} \times 10^{-3} \times 600 \times 10^4 \text{ m}^2 \times 10^{-3}$$

$$\text{Prec (10}^{-3} \text{ m}^3) = 3,6 \text{ PR.}$$
- d) Caudal neto disponible para satisfacer la demanda

$$= Q \text{ (10}^{-3} \text{ m}^3) - \text{Derechos de agua} - \text{Evap.} + \text{Precip.}$$

Los valores así resultantes se muestran en la Tabla 4.

Si hay agua suficiente para satisfacer la demanda si el año anterior es semejante al actual, puesto que el exceso de Q es mayor al exceso de la demanda.

En el caso de que por condiciones de topografía u otras restricciones, el volumen del embalse estuviese limitado a $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ de volumen útil, el volumen total de agua disponible durante el período crítico de abril hasta octubre, sería igual a: el caudal afluente disponible durante el período crítico que es de $1349 \times 10^3 \text{ m}^3$, más el volumen útil del embalse que es de $20.000 \times 10^3 \text{ m}^3$ lo que da un total de $21349 \times 10^3 \text{ m}^3$ los cuales deben distribuirse en los meses críticos.

Para el caso en que considere el cambio en el área de la superficie libre del embalse, se hace necesario calcular para cada intervalo de tiempo (Δt), el cambio de almacenamiento correspondiente, lo que se hace multiplicando el área media en el intervalo de tiempo por el cambio de nivel para el intervalo. Esto se logra usando el gráfico de elevación-área-capacidad del embalse.

Para el cálculo del volumen de agua extraída y aportada al embalse por la evaporación y la precipitación, se requiere un valor promedio del área del agua embalsada durante el interva-

TABLA 4: Resolución de un caso de estudio de operación de embalses donde se considera constante el área del espejo de agua.

M E S	Q 10^{-3} m^3	Demanda 10^{-3} m^3	Derechos agua 10^{-3} m^3	Evapor. 10^{-3} m^3	Precip. 10^{-3} m^3	Q neto 10^{-3} m^3	Exceso 10^{-3} m^3	Exceso Q 10^{-3} m^3
ENERO (31)	8116	1230	389	223	486	7990		6760
FEBRERO (28)	6483	1845	389	290	274	6075		4233
MARZO (31)	8249	2460	389	340	148	7668		5208
ABRIL (30)	3810	3690	389	382	90	3129	561	
MAYO (31)	1527	4428	389	588	18	568	3860	
JUNIO (30)	648	4428	389	840	0	-581	5009	
JULIO (31)	211	4428	214	886	0	-886	5314	
AGOSTO (31)	375	4305	375	853	0	-853	5158	
SEPTIEMBRE (30)	1840	4182	389	832	0	619	3563	
OCTUBRE (31)	295	2460	295	647	0	-647	3107	
NOVIEMBRE (30)	6972	2214	389	361	428	6650		4436
DICIEMBRE (31)	7821	1230	389	223	576	7785		6555

Σ

26572

27192

Volumen del embalse requerido $26572 \times 10^3 \text{ m}^3$

lo de cálculo Δt . Se asume este valor del área y se calcula el cambio en el almacenamiento durante el período Δt , se calcula el almacenamiento al fin del período y de las curvas se obtiene de nuevo el área. La semisuma de las áreas al principio y al fin debe coincidir con el área preseleccionada, de lo contrario debe repetirse el proceso.

Para hacer todo este cálculo, se hace necesario asumir al iniciar el problema, cuál será el volumen del embalse,

Para explicar mejor estos conceptos se expone a continuación el siguiente problema:

Para el Caño José en el Estado Barinas, hacer un estudio de operación de embalses con fines de riego, con los siguientes datos:

Las curvas elevación-área-capacidad que se muestran en la figura 6:

Capacidad máxima del embalse: $327,7 \times 10^5 \text{ m}^3$.

Valores para el año climatológico crítico:

Precipitación del embalse en mm (columna 2, tabla 5)

Evaporación en el embalse en mm (columna 5, tabla 5)

Requerimiento de riego en m^3 (columna 7, tabla 5)

Aporte del río en m^3 (columna 4, tabla 5)

Se asume para el cálculo que el embalse estaba lleno al principio de Noviembre ($327.7 \times 10^5 \text{ m}^3$). Partiendo del valor inicial del área al comienzo de Noviembre (col.13) se asume un valor del área promedio para todo el mes (col.15) y las columnas (3) y (6) se obtienen al multiplicar la (2) y la (5) por el área asumida. La columna (8) que es la descarga por el aliviadero del exceso de agua, se obtiene así:

Cambio almacen. + Descarga aliviadero = precip. + aporte río
 - evapor.- requerimiento riego, ésto es:

$$\text{Col. (8)} = \text{Col. (3)} + \text{Col. (4)} - \text{Col. (6)} - \text{Col. (7)}.$$

Cuando el embalse está lleno, cualquier volumen adicional de agua debe descargarse por el vertedero. En ese caso la diferencia entre las entradas y salidas debe colocarse en la columna (9).

La suma algebraica de las columnas (10) y (12) produce la columna (11) y con este valor de la columna (11) se obtiene la columna (14) mediante el gráfico elevación-área-capacidad que aparece en la figura 6.

La col. (15) que es el promedio de la (13) y la (14) debe chequear con el valor previamente asumido, de otra manera debe repetirse el cálculo.

La col. (16) muestra la variación del nivel de agua en el embalse a lo largo del año y se obtiene del gráfico área-capacidad-elevación y la columna (13).

En este problema para el año crítico, el embalse está lleno todo el año con un volumen mínimo de $18.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ que podría considerarse como volumen muerto del embalse.

Curvas de masa. (Kuiper, Edward, Desarrollo de los Recursos Hidráulicos, CIDIAT, Mérida, Venezuela, 1969). Es una curva que sirve para detectar las tendencias a largo plazo de los ríos y es útil también para determinar los volúmenes de almacenamiento requeridos para producir un caudal seguro.

La capacidad de embalse requerida para obtener un caudal

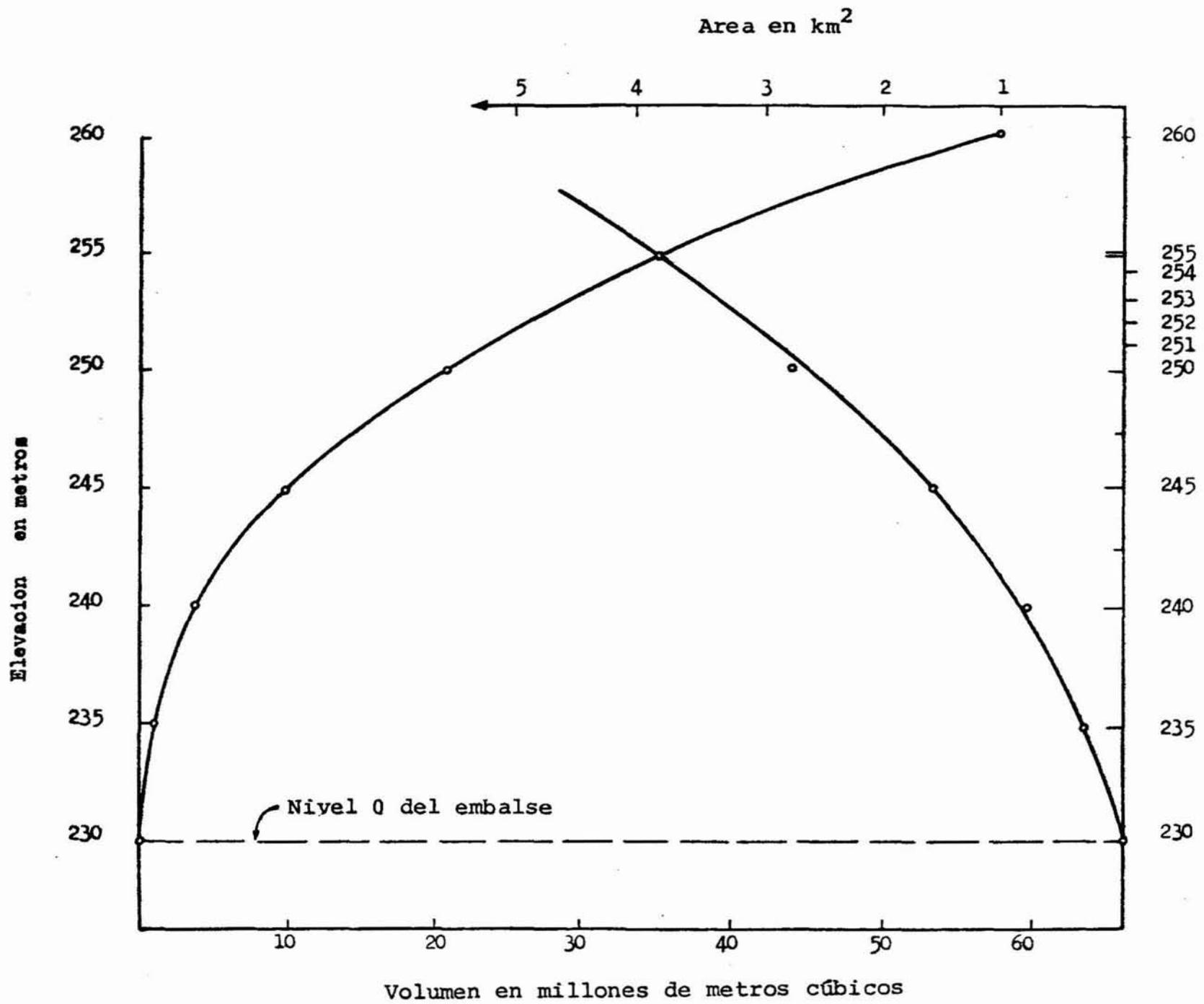


Figura 6. Curvas de elevación-área-capacidad para el sitio de embalse en el Caño José.

TABLA 5: ESTUDIOS DE OPERACION DE UN EMBALSE SOBRE EL CARO JOSE con $327.7 \times 10^5 \text{ m}^3$
DE CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO

Mes (1)	Precipitación en El Embalse		Aporte del RTo En 10^5 m^3 (4)	Evaporación en El Embalse		Requerimien to de Riego En 10^5 m^3 (7)	Descar ga + Cambio AA En 10^5 m^3 (8)	Descar ga. En 10^5 m^3 (9)	ALMACENAMIENTO		Cambio ΔA En 10^5 m^3 (12)	AREA DE LA SUPERFICIE DEL EMBALSE			NIVEL AL PRINCIPIO DEL MES EN M (16)
	En mm (2)	En 10^5 m^3 (3)		En mm (5)	En 10^5 m^3 (6)				Al Prin cipio del mes En 10^5 m^3 (10)	Al fin del mes En 10^5 m^3 (11)		Al Prin del mes En Km^2 (13)	Al Fin del mes En Km^2 (14)	Promedio En Km^2 (15)	
	NOV	94.5	3.40	41.7	120	4.32	0.0	40.8	40.8	327.7	327.7	0.0	3.6	3.6	3.60
DIC	2.9	0.10	9.9	148	5.3	36.7	-32.0		327.7	295.7	-32.0	3.6	3.5	3.55	254.
ENE	15.9	0.50	12.6	170	5.5	57.6	-50.1		295.7	245.6	-50.1	3.5	3.1	3.30	253.
FEB	1.2	0.03	3.9	178	4.5	111.6	-113.2		245.6	134.2	-113.2	3.1	1.9	2.50	251.5
MAR	27.4	0.30	4.0	200	2.4	119.0	-116.1		134.2	18.1	-116.1	1.9	0.5	1.20	247.
ABR	10.7	0.10	9.8	162	0.9	0.0	9.0		18.1	27.1	9.0	0.5	0.6	0.55	237.
MAY	147.9	1.30	34.0	123	1.0	0.0	34.3		27.1	61.4	34.3	0.6	1.1	0.85	239.
JUN	172.9	2.90	98.0	112	1.9	0.0	99.0		61.4	160.4	99.0	1.1	2.3	1.70	242.5
JUL	154.3	4.20	97.2	104	2.9	0.0	98.5		160.4	258.9	98.5	2.3	3.2	2.75	248.
AGO	123.4	4.20	174.4	125	4.3	0.0	168.0	99.2	258.9	327.7	68.8	3.2	3.6	3.40	251.7
SEP	136.7	4.90	122.9	131	4.7	0.0	123.1	123.1	327.7	327.7	0.0	3.6	3.6	3.50	254.
OCT	155.6	3.60	99.6	130	4.7	0.0	100.5	100.5	327.7	327.7	0.0	3.6	3.6	3.60	254.

Nota: En este problema se ha asumido que el Coeficiente de escorrentía del área inundada antes de construir el Embalse es cero, y que no existen obligaciones por derechos adquiridos de agua

"Q reg" se puede obtener dibujando la línea horizontal que se muestra en la figura 7a.

Para períodos mayores de tiempo, una herramienta más segura es la constituida por la curva de masa que se muestra en la fig. 7b, y cuya abscisa está dada en las mismas unidades de tiempo que la del hidrograma, pero cuya ordenada constituye el volumen total de agua que ha pasado desde el tiempo cero hasta ese punto.

$$V = \int_0^t Q \, dt = \sum Q \, \Delta t$$

La pendiente de la curva de masa en un punto, representa el caudal en ese punto. La pendiente de una línea que une dos puntos cualquiera de la curva de masa, representa la descarga media que puede arrojar la corriente entre esos dos puntos, esto significa que la diferencia entre ordenadas de dos puntos cualquiera de la curva de masa es la suma del volumen escurrido durante el intervalo correspondiente de tiempo.

Otros valores importantes de la curva de masa y su significado físico se muestran en la figura 8.

Los datos a usarse para el desarrollo de la curva de masa, deben corresponder al período de sequía más crítico del registro del caudal. Puede derivarse con gastos diarios mensuales a anuales, etc. de acuerdo con el tipo de regulación que se requiera.

La curva de masa puede utilizarse al igual que los estudios de operación para determinar la capacidad de embalse necesario para proporcionar un caudal seguro dado, y para determinar el caudal seguro correspondiente a una capacidad dada.

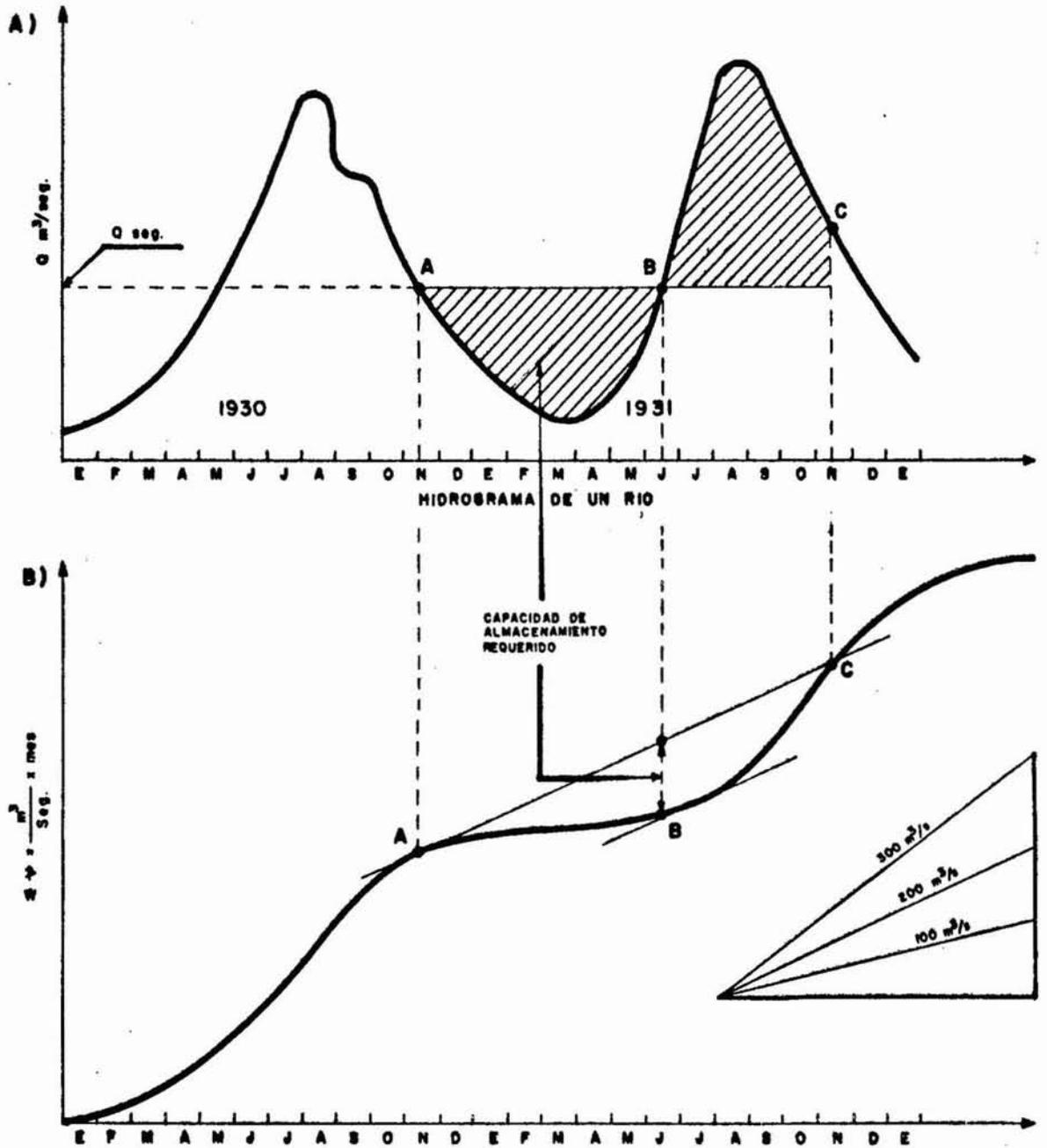


Fig. 7 ... CURVA DE MASA

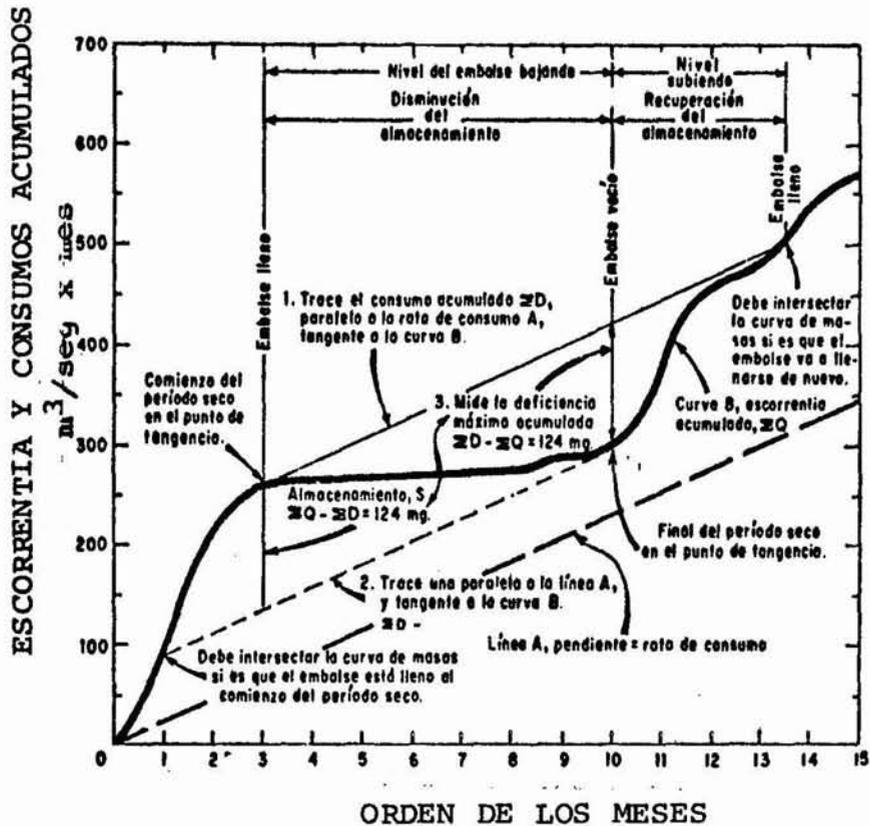


Figura 8. Diagrama de masas o método de Rippl para la determinación de las necesidades de almacenamiento requeridas en un embalse. (Adaptado de Fair, Geyer y Okum, Elements of water supply and wastewater disposal, John Wiley and Sons, Londres, 1968)

Para la determinación de la capacidad de un embalse el procedimiento es el siguiente:

- a) Regulación total. En la figura 9 se presenta una curva de masa. La línea recta \overline{OP} representa el caudal medio ó caudal seguro que podría extraerse del río durante el período y el cual es de $43.75 \text{ m}^3/\text{seg.}$

Para determinar la capacidad de almacenamiento del embalse requerida para lograr este caudal seguro, se trazan dos envolventes a la curva de masa y paralelas a la recta \overline{OP} . La distancia vertical entre esas dos envolventes es la capacidad requerida.

- b) Regulación parcial de caudales. Si se desea una capacidad de embalse para regular el río por debajo de su caudal medio, por ejemplo para $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$ se traza una línea cuya pendiente sea de $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$, como se muestra en la figura 10. Debe notarse que cada vez que la pendiente de la curva de masa es menor a la de la línea SR hay una deficiencia de agua y viceversa. En los puntos A, B, C, D, F, G, H, I que separan los períodos de exceso de los períodos de deficiencia, la curva tiene una tangente paralela a SR. Trazando paralelas a SR se determinan estos puntos críticos y los tramos subrayados representan los períodos de sequía. La capacidad de embalse para remediar cada sequía está dada por la distancia vertical entre dos tangentes consecutivas (envolventes del período). De esta forma se calculan todas las capacidades de embalse y se adopta la mayor.

Curvas de caudales seguros. La curva de caudales seguros se obtiene calculando las capacidades de embalse requeridas para varios niveles de regulación y constituyendo una curva de cau

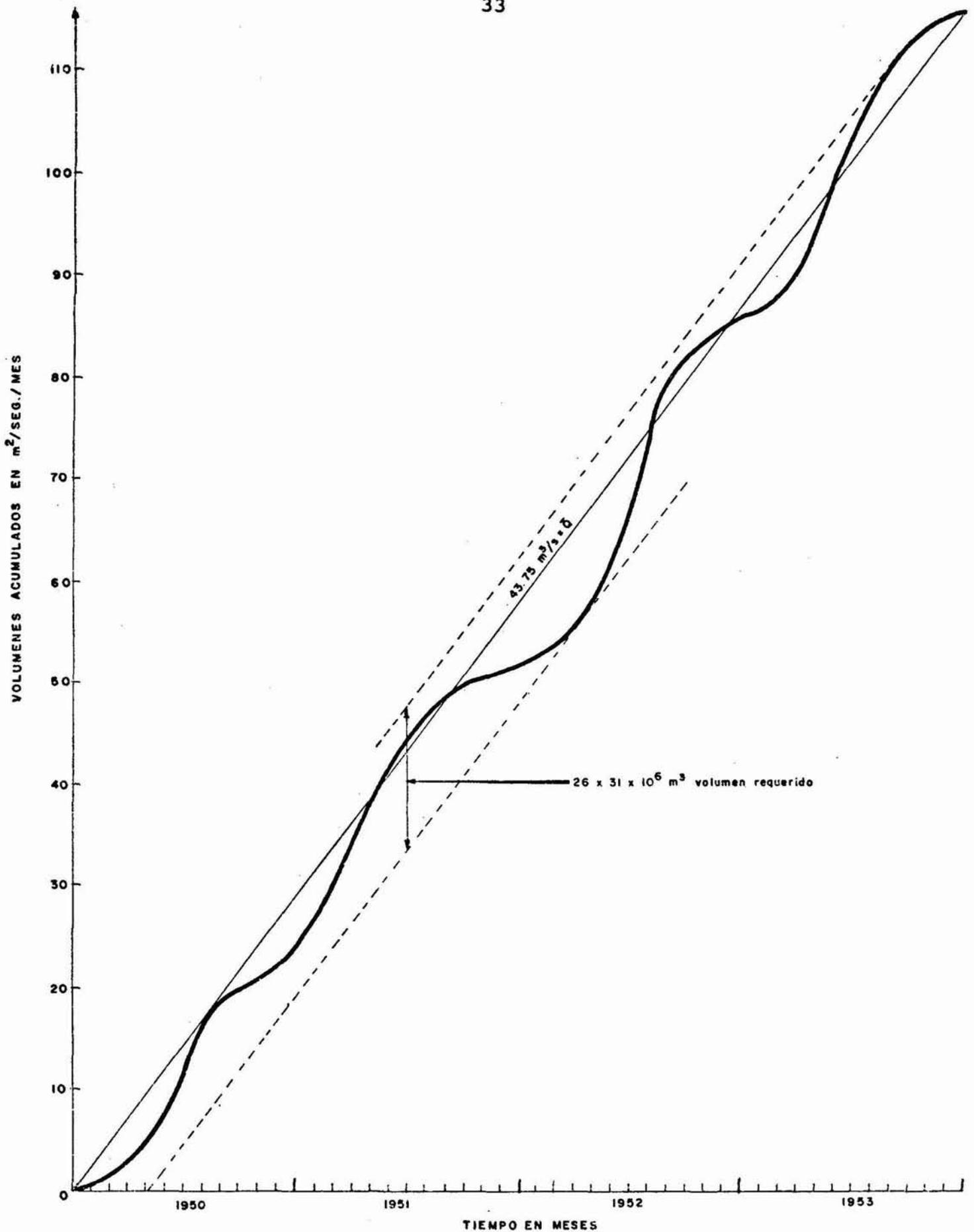


Fig. 9. Determinación del volumen de embalse requerido para regulación total.

dal seguro contra capacidad de almacenamiento como se muestra en la Fig. 10.

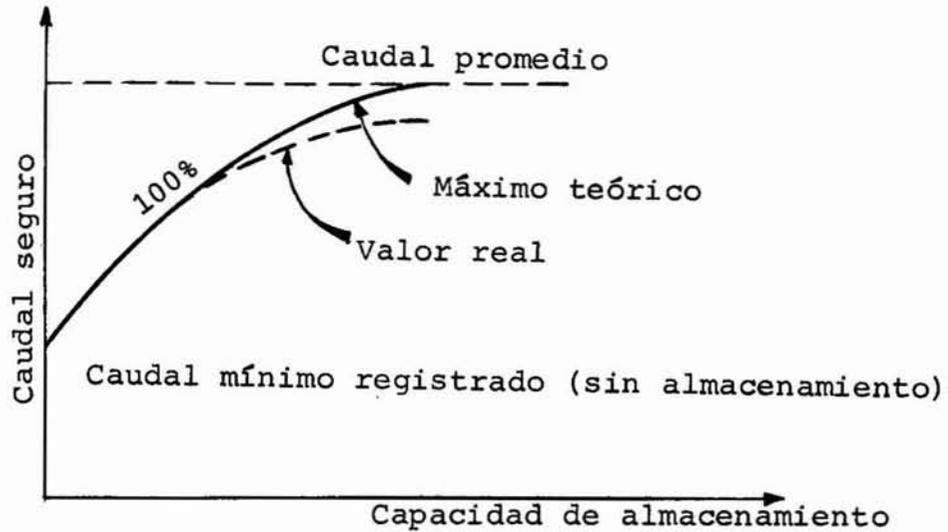


Fig. 10. Curva de caudales seguros

El máximo teórico que puede obtenerse de un embalse es su caudal medio, pero tomaría entonces mucho tiempo para llenarlo, las pérdidas por infiltración y evaporación aumentan mucho, y por lo tanto la curva de caudales seguros declina.

Curvas de caudales seguros parciales. Puede desearse tener un caudal "seguro" con cierto nivel de seguridad 95 ó 90%. En el ejemplo anterior para obtener $30 \text{ m}^3/\text{seg}$ con 100% de seguridad se requería un embalse con capacidad de $8.58 \times 10^6 \text{ m}^3$ si se toma un embalse con una capacidad de $4.72 \times 10^6 \text{ m}^3$, cual es el porcentaje de tiempo durante el cual la demanda de $30 \text{ m}^3/\text{seg}$. está satisfecha?. Para hacer esta determinación deben identificarse los períodos de deficiencias que requieren una capacidad mayor de $4.72 \times 10^6 \text{ m}^3$.

En la fig. 10 sólo el período FG requiere una capacidad ma-

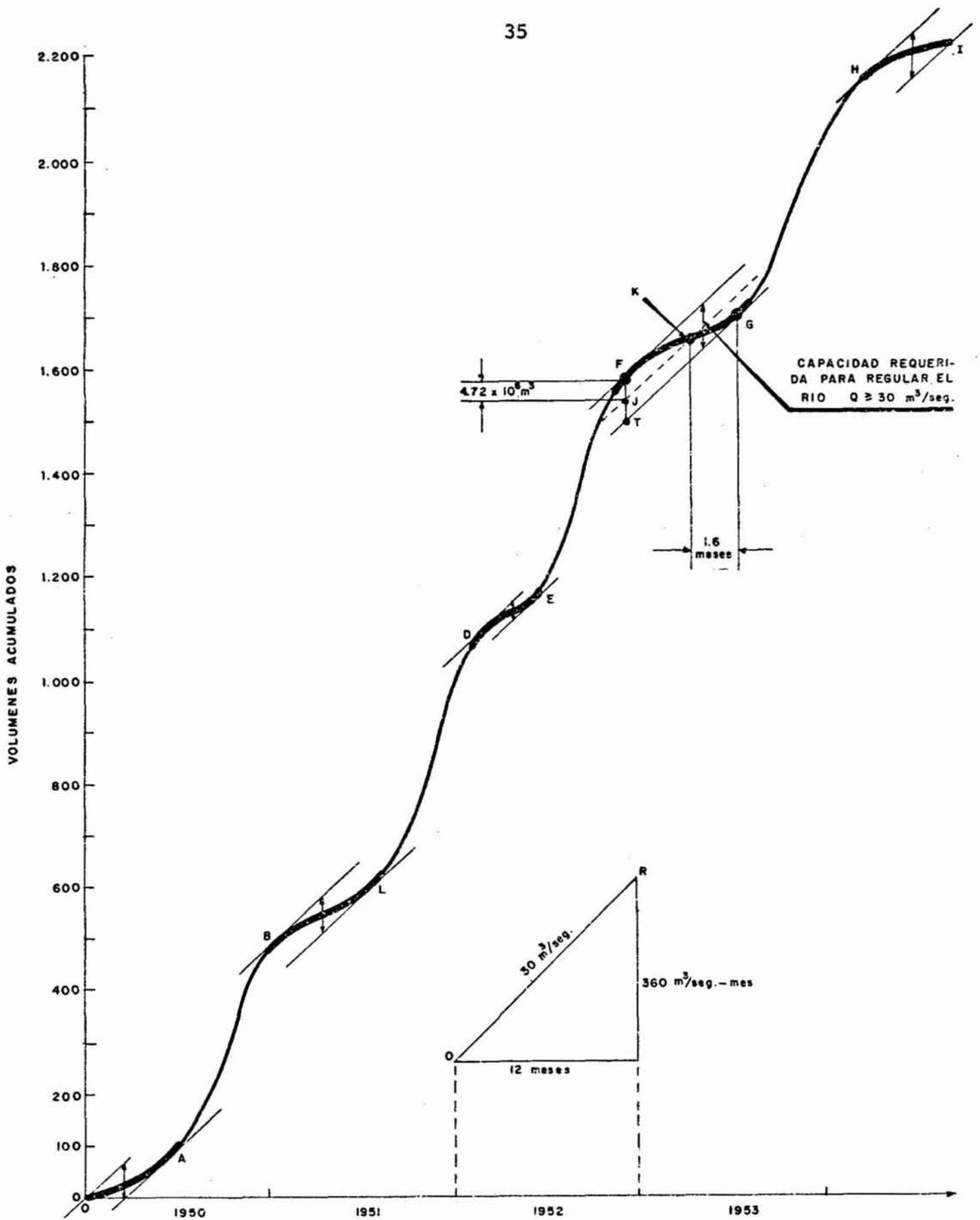


Fig. 11. Uso de la curva de masa para determinar el volumen de un embalse para la regulación parcial de un río.

yor. Entonces en la vertical FT se lleva el punto J de manera que $FJ = 4.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ y se traza por J una paralela a SR que corta la curva de masa en K. De 0 a K el caudal de $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$ se puede proveer con el embalse de $4.72 \times 10^6 \text{ m}^3$ igualmente de G a I.

En el punto F el embalse estará lleno lo que permitirá satisfacer la demanda de F a K; en K el embalse estará vacío y de K a G la demanda no podrá ser satisfecha. A partir de G el embalse se llena al mismo tiempo que proporciona los $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$

El único período durante el cual la demanda no está satisfecha es de K a G (1.6 meses). Como el período de estudio es de 48 meses, 46.4 representa el 96.6%, ésto es, se puede proporcionar un caudal seguro de $30 \text{ m}^3/\text{seg.}$ el 96.6 % del tiempo. Varios de estos valores pueden determinarse cambiando tanto el caudal seguro como la capacidad del embalse para así determinar las curvas de caudales seguros parciales que se muestran en la fig. 11.

Otros casos. Existen muchos otros casos donde se aplica la ecuación fundamental de la hidrología, tal como por ejemplo, lo es el cálculo del rendimiento seguro de un acuífero o el tránsito de caudales por embalses y canales.

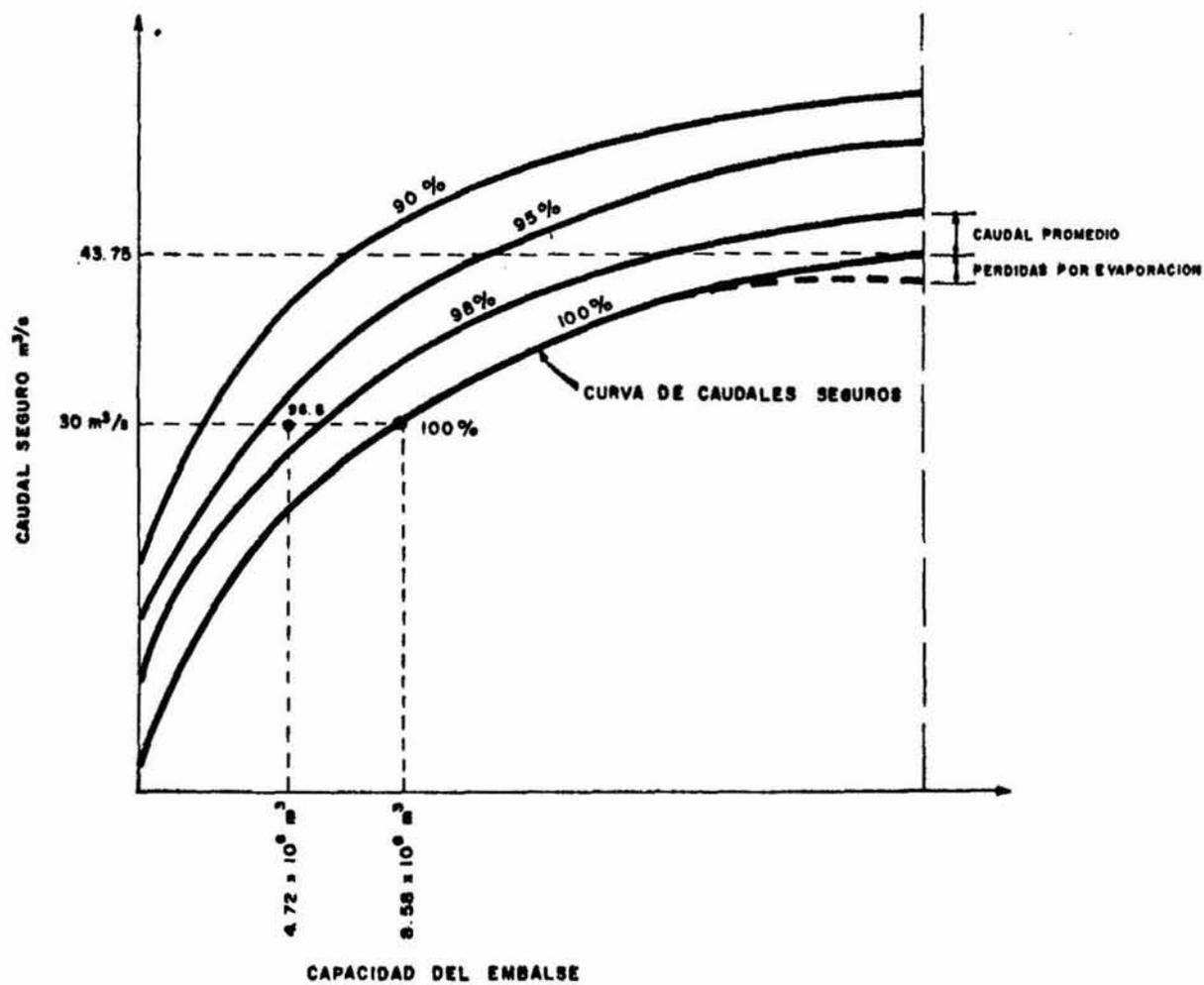


Fig. 12. Curvas de caudales seguros parciales.

