

5

Almacenamiento y tránsito en vasos y cauces

En este capítulo se hace referencia a los conceptos hidrológicos fundamentales necesarios para el diseño de vasos y al tránsito de avenidas en cauces, los cuales, aunque relativamente simples, son de gran importancia en hidrología, pues en gran parte constituyen las bases sobre las que se sustenta el dimensionamiento de las presas y otras obras de aprovechamiento y protección contra inundaciones.

5.1 TIPOS DE ALMACENAMIENTOS Y SUS CARACTERÍSTICAS

La siguiente descripción se refiere a los tipos de almacenamientos y sus características de interés en la hidrología. Los detalles restantes corresponden a otras materias, como obras hidráulicas e hidráulica fluvial.

Un vaso de almacenamiento sirve para regular los escurrimientos de un río, es decir, para almacenar el volumen de agua que escurre en exceso en las temporadas de lluvia para posteriormente usarlo en las épocas de sequía, cuando los escurrimientos son escasos. Esto se puede ilustrar con una situación como la que se muestra en la figura 5.1, donde se ha dibujado, en forma muy esquemática, el hidrograma anual de escurrimiento en un río y una demanda. En este caso, la demanda de agua, constante durante todo el año, es mayor de lo que aporta el río en los meses de diciembre a junio, pero menor de lo que aporta de julio a noviembre. Es necesario, entonces, almacenar el volumen sobrante para poder satisfacer la demanda cuando el escurrimiento en el río no es suficiente, para lo cual se requiere un vaso de almacenamiento.

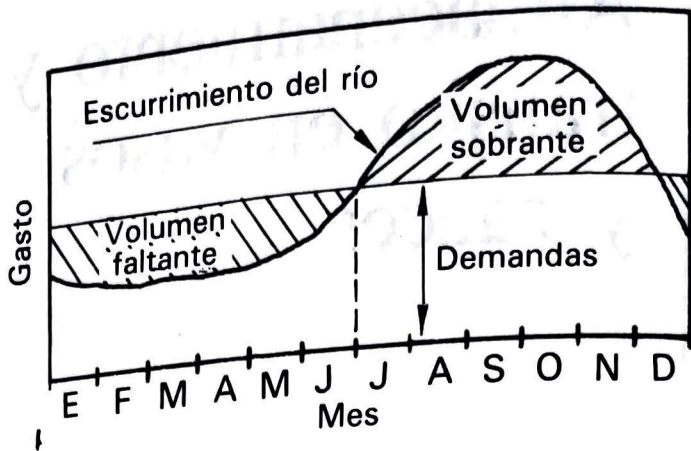


Figura 5.1

Un vaso de almacenamiento puede tener uno o varios de los siguientes propósitos:

- a) Irrigación.
- b) Generación de energía eléctrica.
- c) Control de avenidas.
- d) Abastecimiento de agua potable.
- e) Navegación.
- f) Acuicultura.
- g) Recreación.
- h) Retención de sedimentos.

Los principales componentes de un vaso de almacenamiento se muestran en la figura 5.2.

El NAMINO (*nivel de aguas mínimas de operación*) es el nivel más bajo con el que puede operar la presa. Cuando ésta es para irrigación y otros usos, el NAMINO (también llamado en este caso NAMin o *nivel de aguas mínimas*) coincide con el nivel al que se encuentra la entrada de la obra de toma. En el caso de presas para generación de energía eléctrica, el NAMINO se fija de acuerdo con la carga mínima necesaria para que las turbinas operen en buenas condiciones. El *volumen muerto* es el que queda abajo del NAMINO o NAMin; es un volumen del que no se puede disponer. El *volumen de azolvamiento* es el que queda abajo del nivel de la toma y se reserva para recibir el acarreo de sólidos por el río durante la vida útil de la presa. Es conveniente hacer notar que el depósito de sedimentos en una presa no se produce como está mostrado en la figura 5.2 —con un nivel horizontal— sino que los sedimentos se reparten a lo largo del embalse, teniéndose los más gruesos al principio del mismo y los más finos cerca de la cortina. De hecho, en algunos casos existe movimiento de los sedimentos depositados dentro del vaso, fenómeno

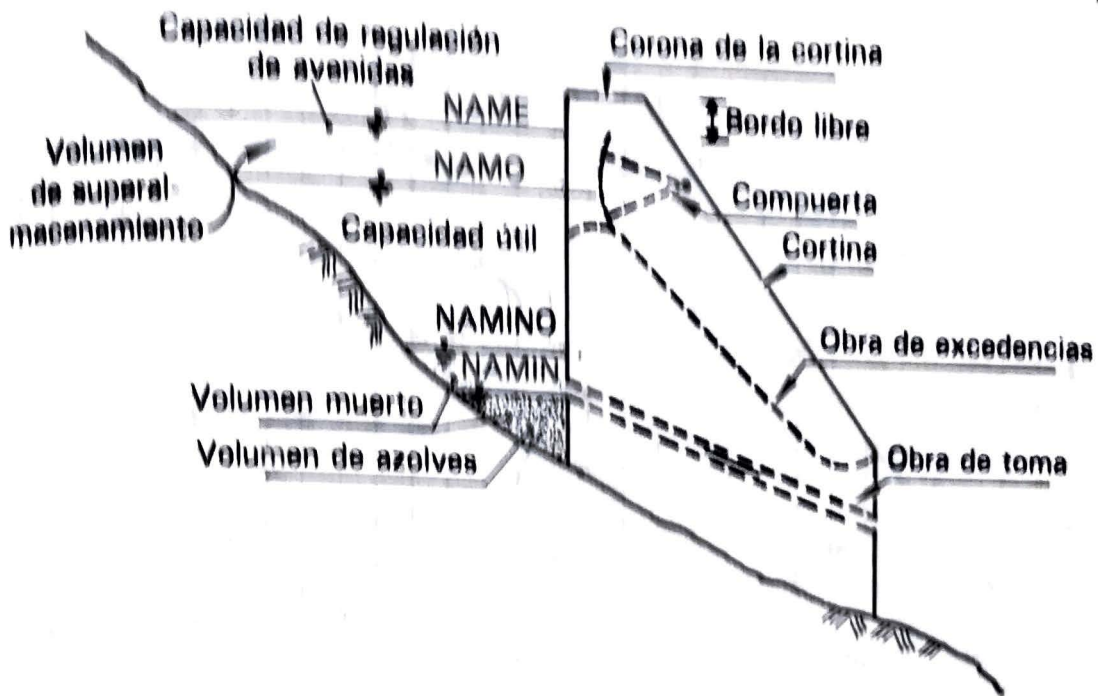


Figura 5.2 Principales componentes de un vaso.

que se conoce como *corriente de densidad*. La operación de la presa se lleva a cabo entre el NAMINO o NAMIn y el NAMO (*nivel de aguas máximas ordinarias o de operación*). El NAMO es el máximo nivel con que puede operar la presa para satisfacer las demandas; cuando el vertedor de excedencias (estructura que sirve para desalojar los volúmenes excedentes de agua que pueden poner en peligro la seguridad de la obra) no es controlado por compuertas, el NAMO coincide con su cresta o punto más alto del vertedor. En el caso de que la descarga por el vertedor esté controlada, el NAMO puede estar por arriba de la cresta e incluso puede cambiar a lo largo del año. Así, en época de estiaje es posible fijar un NAMO mayor que en época de avenidas, pues la probabilidad de que se presente una avenida en la primera época es menor que en la segunda. El volumen que se almacena entre el NAMO y el NAMIn o NAMINO se llama *volumen o capacidad útil* y es con el que se satisfacen las demandas de agua.

El NAME (*nivel de aguas máximas extraordinarias*) es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición. El volumen que queda entre este nivel y el NAMO, llamado *superalmacenamiento*, sirve para controlar las avenidas que se presentan cuando el nivel en el vaso está cercano al NAMO. El espacio que queda entre el NAME y la máxima elevación de la cortina (*corona*) se denomina *bordo libre* y está destinado a contener el oleaje y la marea producidos por el viento, así como a compensar las reducciones en la altura de la cortina provocadas por sus asentamientos.

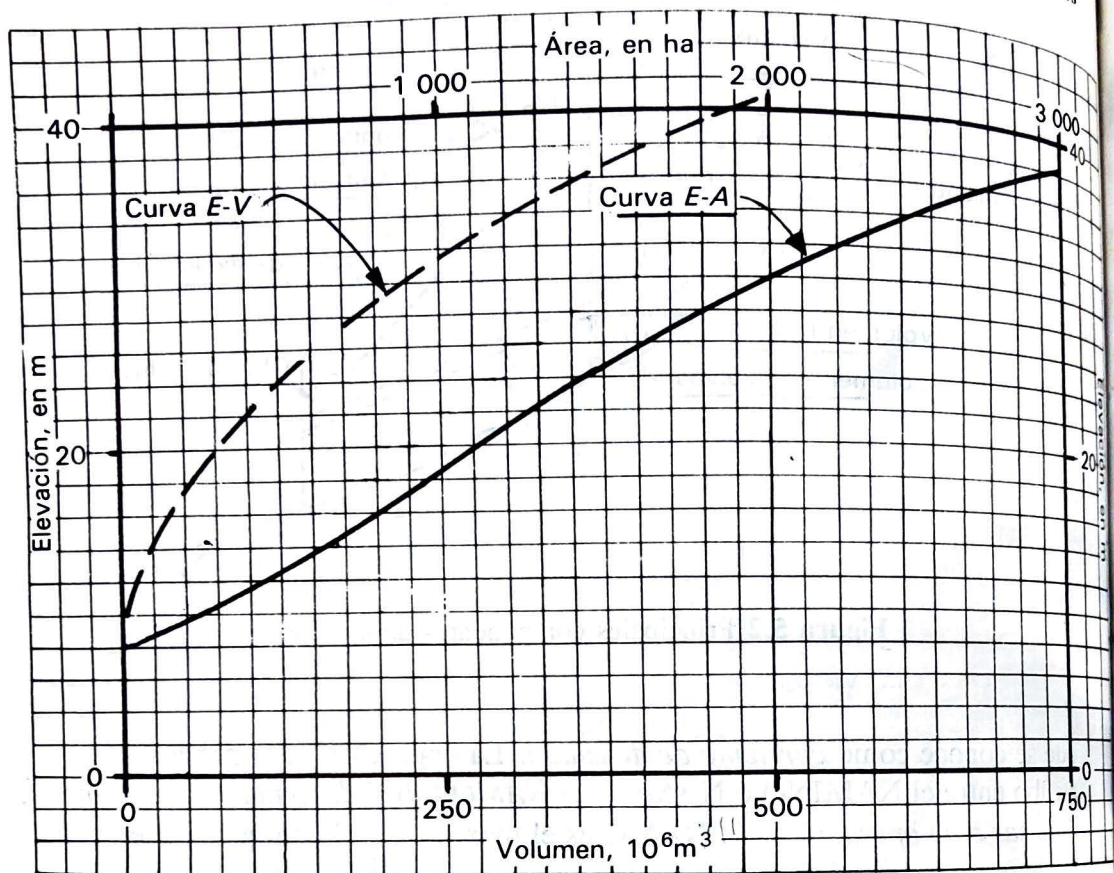


Figura 5.3 Curvas elevación-volumen y elevación-área.

En resumen, existen cuatro volúmenes principales en toda presa que es necesario determinar para diseñar el vaso: el volumen de azolves, el volumen muerto, el volumen útil y el volumen de superalmacenamiento. La determinación de los dos primeros está fuera del enfoque de este texto; el volumen de azolves es materia de la hidráulica fluvial y el volumen muerto, en el caso de plantas hidroeléctricas, depende, entre otras cosas, del tipo de turbina que se use. A continuación se estudiarán métodos para evaluar el volumen útil que debe tener una presa para satisfacer las demandas y el volumen de superalmacenamiento necesario para que la presa no corra peligro.

5.2 ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN ÚTIL Y EL NAMO

Existen dos grupos básicos de datos necesarios para el diseño de un vaso de almacenamiento: planos topográficos y registros hidrológicos. Los primeros proporcionan la relación que hay entre los volúmenes, áreas y elevaciones del

vaso, y los segundos sirven para estimar los volúmenes o gastos que llegarán al vaso durante su operación. Los datos topográficos se sintetizan mediante curvas elevaciones-volúmenes y elevaciones-áreas, como se muestra en la figura 5.3.

Por otra parte, para estimar el volumen útil que se requiere para satisfacer una determinada demanda, se deben tener datos de volúmenes escurridos por el río durante un tiempo relativamente largo. Desde luego, entre mayor sea el lapso de registros, más confiable será la estimación del volumen útil. En general, un registro de 20 años o más proporciona una buena estimación.

⊛ Es recomendable determinar el volumen útil de una presa en dos pasos: el primero consiste en hacer una primera estimación usando datos mensuales de aportaciones y demandas e ignorando factores de menor importancia, como la evaporación y precipitación directa en el vaso; el segundo es simular el funcionamiento del vaso para un periodo largo, tomando en cuenta las variaciones mensuales y anuales de aportaciones y demandas y todos los demás factores que intervienen en la cantidad de agua almacenada en un determinado instante.

Cuando se desea hacer una primera estimación del volumen útil se pueden usar dos métodos. El primero, llamado de la *curva masa* o *diagrama de Rippl*, desarrollado en 1883 (referencia 5.1), es útil cuando las demandas son constantes, y el segundo, conocido como *algoritmo del pico secuente*, es conveniente cuando las demandas varían en el tiempo.

Una curva masa es una representación gráfica de volúmenes acumulados contra el tiempo. En la figura 5.4 se muestra una parte de una curva masa.

Supóngase que, en el caso de la figura 5.4, se tiene una demanda constante de agua de $56.3 \text{ m}^3/\text{s}$. La curva masa de demandas es, entonces, una línea recta con pendiente de $56.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

La pendiente de la curva masa de escurrimiento es el gasto que pasa por el sitio; entonces, cuando la pendiente de la curva de demandas ag es mayor que la de la curva de escurrimiento af , el gasto demandado es mayor que el aportado por el río y viceversa. Obviamente, en los puntos en que la curva de escurrimientos tiene una pendiente de 56.3 , el gasto de aportación es igual al de demanda, como sucede en los puntos b , c y e de la figura 5.4.

Ahora bien, supóngase que el vaso se encuentra lleno en el punto a . Entonces, se observa lo siguiente:

- a) Entre el punto a y el b la demanda es menor que la aportación, por lo que el vaso permanece lleno y el agua sobrante sale por la obra de excedencias.
- b) Hasta el punto b , en diciembre del primer año, se ha derramado un

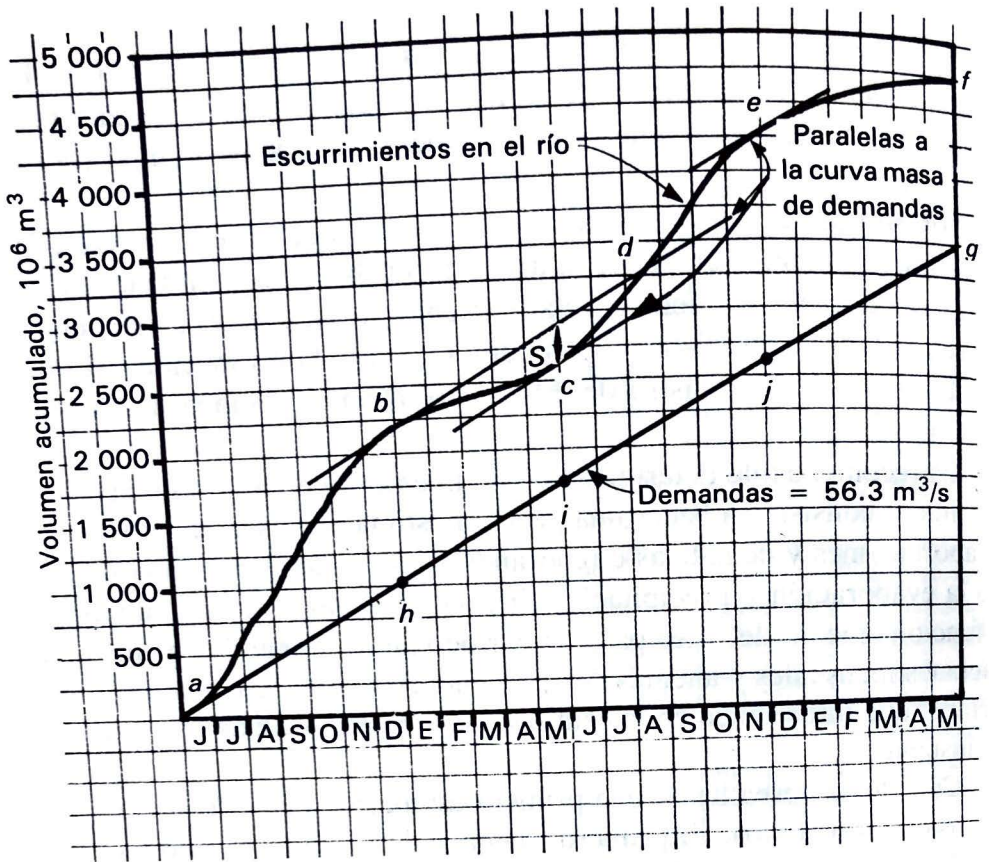


Figura 5.4

- volumen igual a la diferencia de ordenadas entre los puntos b y h , que, en el caso de la figura 5.4, es de aproximadamente $1\,175 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- c) Del punto b al c el gasto de aportación es menor que el de demanda, por lo que, en este lapso, el volumen almacenado, y por lo tanto también el nivel del agua en el vaso, disminuye.
- d) En el punto c se llega al nivel mínimo en el vaso; la máxima diferencia entre el volumen de aportación y el de demanda del punto b al c está dado por la diferencia de ordenadas S entre una recta tangente al punto b y el punto c .
- e) Del punto c al e el gasto de aportación es nuevamente mayor que el de demanda y el volumen almacenado aumenta otra vez.
- f) Para que durante el lapso indicado por la figura 5.4 no se tenga déficit, es decir, para que no se deje de cumplir con la totalidad de la demanda, el volumen útil mínimo necesario es S (véase inciso d). De esta manera, dado que la presa está llena en el punto b , al llegar al punto c el nivel es el del NAMINO. En estas condiciones, del punto

- c* al *d* se incrementa nuevamente el volumen almacenado y en el punto *d* la presa vuelve a estar llena.
- g) Entre el punto *d* y el *e* la presa permanece llena y se vuelven a tener derrames.
- h) Del punto *e* en adelante el gasto de aportación es otra vez menor que el de demanda y el volumen almacenado disminuye.
- i) La línea *abde* es una curva masa de salidas totales de la presa (esto es, salidas para cubrir la demanda más derrames) que tiene una pendiente mínima de $56.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Este método se aplica a todo el periodo de datos, y la máxima diferencia que se encuentre entre una tangente a los puntos tales como el *b* y el *e* y otra tangente a los puntos tales como el *c* será el volumen útil mínimo necesario para satisfacer la demanda, *si se repitieran exactamente las aportaciones que se usan como datos*. Es obvio que esto nunca sucede, por lo que el volumen útil, así calculado, no garantiza que no haya algún déficit durante la operación de la presa en su vida útil.

Cuando la demanda no es constante, si bien es posible aplicar el método anterior, es más conveniente hacer el análisis numéricamente en lugar de hacerlo en forma gráfica. El *algoritmo del pico secuento* (referencia 5.3), que se presenta a continuación, se basa en la misma idea de Rippl, pero tiene la ventaja de que es más fácil de usar, especialmente para demandas variables. Este método se ilustrará con un ejemplo.

Ejemplo 5.1. Dada una serie de volúmenes de entrada al vaso X_i y de salida D_i para satisfacer la demanda durante un lapso de T semanas, meses, años, etc. (columnas 2 y 3 de la tabla 5.1, respectivamente), el algoritmo del pico secuento consiste en:

- a) Calcular la entrada neta al vaso $(X_i - D_i)$ para $i = 1, 2, \dots, 2T$ (columna 4) y la entrada neta acumulada $\sum_{j=1}^i (X_j - D_j)$ para $i = 1, 2, \dots, 2T$ (columna 5).
- b) Encontrar el primer pico (valor máximo) de las entradas netas acumuladas, P_1 , el cual equivale a la diferencia de ordenadas entre los puntos *b* y *h* de la figura 5.4. En el ejemplo de la tabla 5.1, $P_1 = +175 \times 10^3 \text{ m}^3$.
- c) Localizar el *pico secuento*, P_2 , esto es, el siguiente pico *mayor* que P_1 , el cual es equivalente a la diferencia de ordenadas entre los puntos *e* y *j* de la figura 5.4 y, en el caso de la tabla 5.1, $P_2 = +260 \times 10^3 \text{ m}^3$.

- d) Entre el primer par de picos, P_1 y P_2 , hallar el valor más bajo de la columna 5 de la tabla 5.1. Este valor corresponde a la diferencia de ordenadas entre los puntos c e i de la figura 5.4 y, por lo tanto, la diferencia $T_1 - P_1$ equivale al volumen S en la figura citada. De la tabla 5.1, $T_1 = -845 \times 10^3 \text{ m}^3$ entonces:

$$S = P_1 - T_1 = [175 - (-845)] \times 10^3 = 1\,020 \times 10^3 \text{ m}^3$$

- e) Buscar el pico seciente P_3 mayor que P_2 .
 f) Encontrar el valor mínimo T_2 que se encuentre entre P_2 y P_3 y calcular $P_2 - T_2$.
 g) Repetir los pasos e y f para todos los picos secientes de los $2T$ intervalos de tiempo.

En los ejemplos de la figura 5.4 y la tabla 5.1 no es necesario realizar los pasos e , f , y g , pues sólo se tienen dos picos. No obstante, pueden aparecer más picos en un registro más largo.

La capacidad útil mínima necesaria para que no se tenga déficit en el periodo de los datos es, como en el caso de la curva masa:

$$S_u = \text{máx}(P_j - T_j) \quad \forall j$$

Nuevamente, dado que el periodo de datos nunca se repetirá exactamente igual durante la vida útil de la presa, este volumen útil no garantiza que no habrá déficit.

En el ejemplo de la tabla 5.1 el volumen útil es $P_1 - T_1 = 1\,020 \times 10^3 \text{ m}^3$. En la columna 6 de la misma tabla se han escrito los volúmenes que contendría el vaso si se presentaran los escurrimientos y demandas señalados en las columnas 2 y 3 y si el vaso está lleno al principio del mes 1. Obsérvese que en el mes 5 del segundo año el vaso se vacía totalmente, pero no hay ningún déficit en la satisfacción de la demanda.

Cuando se tiene alguna libertad para variar las demandas, es posible estimar un volumen hidrológicamente "adecuado" mediante una curva que relacione la demanda anual con la capacidad útil, como la que se muestra en la figura 5.5. Cada punto de esta curva se obtiene mediante un análisis de curva masa o pico seciente. Si las demandas mensuales son variables, el cociente de la demanda de cada mes entre la anual debe ser el mismo para cada punto de la curva. Normalmente, en una curva como la de la figura 5.5 existe un punto A tal que para una demanda anual mayor que la correspondiente a dicho punto, un incremento pequeño en las demandas exige un incremento relativamente grande en el tamaño del vaso y viceversa. Por lo tanto, un

Tabla 5.1

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
mes	X_i	D_i	$X_i - D_i$	$(X_i - D_i)_{ac}$	Vol.	Derrame	Estado del vaso
	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	$10^3 m^3$	
1	120	220	-100	-100	920		
2	130	250	-120	-220	800		
3	115	305	-190	-410	610		
4	125	480	-355	-765	255		
5	140	305	-165	-930	90		
6	325	250	+ 75	-855	165		
7	450	220	+230	-625	395		
8	590	180	+410	-215	805		
9	380	150	+230	+ 15	1 020	15	lleno
10	280	150	+130	+145	1 020	130	lleno
11	190	160	+ 30	+175	1 020	30	lleno
12	110	200	- 90	+ 85	930		
1	120	220	-100	- 15	830		
2	130	250	-120	-135	710		
3	115	305	-190	-325	520		
4	125	480	-355	-680	165		
5	140	305	-165	-845	0		vacío
6	325	250	+ 75	-770	75		
7	450	220	+230	-540	305		
8	590	180	+410	-130	715		
9	380	150	+230	+100	945		
10	280	150	+130	+230	1 020	55	lleno
11	190	160	+ 30	+260	1 020	30	lleno
12	110	200	- 90	+170	930		

vaso que aproveche la máxima cantidad de agua posible sin ser demasiado costoso tendría que tener el volumen útil correspondiente al punto A.

En la figura 5.5 se observa que, en general, una presa que aprovechara el 100% del escurrimiento resulta muy costosa.

Las consideraciones anteriores están basadas en factores hidrológicos únicamente y la decisión final tendrá, desde luego, que tomar en cuenta otras consideraciones, como las económicas, sociales, etc.

Con el cálculo de la curva masa o el algoritmo del pico secuente y una gráfica como la de la figura 5.5, es posible tener una serie de opciones preliminares de volumen útil. Sin embargo, al estar funcionando la presa, aunque los valores medios se conserven, la ocurrencia de varios años secos durante su vida útil puede producir déficit que hagan que la obra deje de ser renta-

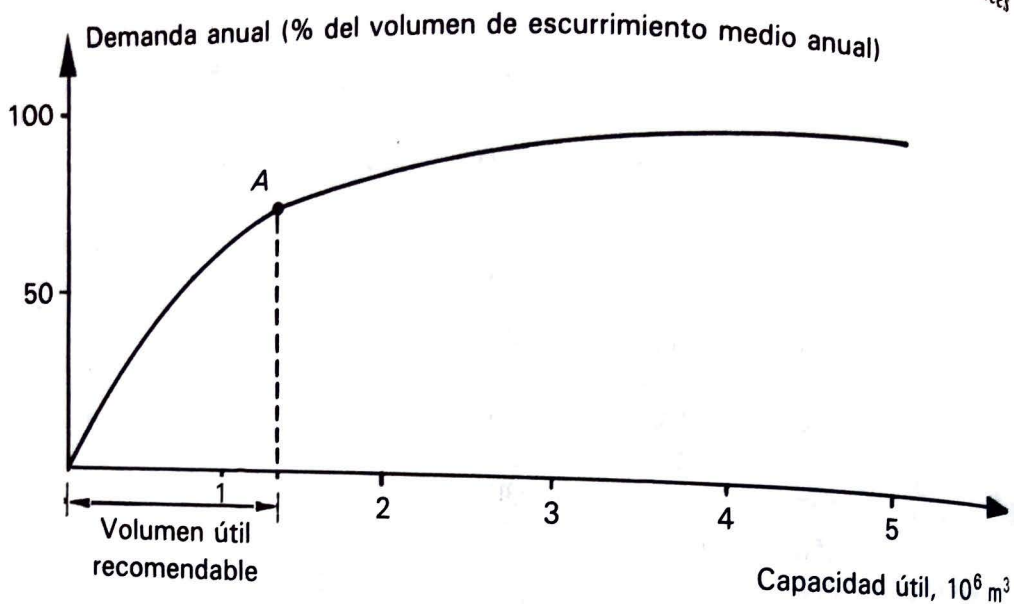


Figura 5.5

ble, o bien la ocurrencia de varios años húmedos puede ocasionar una gran cantidad de desperdicios que pudieran aprovecharse aumentando el volumen útil. Además, las evaporaciones, que no pueden ser tomadas en cuenta en análisis como los descritos anteriormente, pueden llegar a afectar de manera considerable el funcionamiento de la presa. Todos estos aspectos del diseño de vasos de almacenamiento no son tomados en cuenta en los métodos anteriores. Por ello, es siempre necesario corroborar el valor del volumen útil estimado por medio de la simulación del funcionamiento del vaso.

5.3 FUNCIONAMIENTO DE VASOS

La ecuación fundamental para la simulación del funcionamiento de vasos es la de *continuidad*, que expresada en un intervalo de tiempo Δt dado es:

$$X - D = \Delta V \quad (5.1)$$

donde

- X = volumen de entradas al vaso durante el intervalo Δt .
- D = volumen de salidas del vaso durante el mismo intervalo.
- ΔV = cambio del volumen almacenado en el vaso durante el intervalo Δt .

El intervalo de tiempo Δt que se use depende del tamaño del vaso; generalmente se toma $\Delta t =$ un mes, pero en vasos muy grandes, cuyos efectos