

ESTUDIOS DE OPERACION

por el Prof.

Cleve H. Milligan

Introducción

En los estudios de operaciones se trata de simular en papel, las verdaderas operaciones de los proyectos hidráulicos, o ciertos aspectos de los mismos. Estos son estudios de balances hídricos, en los cuales se miden o se estiman todos los componentes de entrada (recargas de agua) y todos los de salida (usos y pérdidas), igualmente que los cambios en almacenaje; y se lleva una cuenta corriente de éstos, similar a una cuenta de banco. Estos estudios dan información respecto a la capacidad del suministro de agua para cubrir las demandas; la necesidad de depósitos y la capacidad requerida para éstos; la magnitud de las pérdidas; la idoneidad de las normas de operación y muchos otros aspectos importantes de los proyectos de desarrollo de aguas. Para estos estudios se requieren sin embargo, un grupo de normas que sirvan de guía.

Las ecuaciones fundamentales que se utilizan en estos estudios son :

$$\text{Recarga total} - \text{Descarga total} - \text{Variación almacenaje} \dots (1)$$

la cual es una forma del principio de continuidad y :

$$CQt = dA \dots (2)$$

donde :

C = una constante que depende de las unidades de las variables en la ecuación;

Q = caudal;

A = área cubierta por la lámina;

d = espesor de la lámina en el área cubierta;

t = tiempo necesario para cubrir el área A, a un espesor d.

En el sistema de unidades inglesas, $C = 1,0$, si Q = al caudal en pies cúbicos por segundo; t = tiempo en horas; A = área en acres; d = espesor promedio de la lámina sobre un área, dado en pulgadas.

En el sistema métrico, si Q = el caudal en litros por segundo, el área es dada en hectáreas, t es expresada en horas y d es el espesor de la lámina en centímetros, $C = 27,8$.

Si se expresa la ecuación (1) simbólicamente en incrementos discretos de tiempo,

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \cdot t + \frac{O_1 + O_2}{2} \cdot t = S_2 - S_1 \dots \dots \dots (3)$$

donde :

- I_1 = caudal total de entrada al principio de un incremento definido de tiempo, t ;
- I_2 = caudal total de entrada al final de un incremento definido de tiempo, t ;
- O_1 = caudal total de salida al principio de un incremento de tiempo;
- O_2 = caudal total de salida al final de un incremento de tiempo;
- S_1 = volumen total de agua en almacenaje al principio de un período de tiempo;
- S_2 = volumen total de agua en almacenaje al final de un período de tiempo.

Si el incremento de tiempo, o el período de tiempo, es de un mes, entonces I_1 es el caudal total de entrada al comienzo del mes y I_2 es el caudal total de entrada al final del mes. Los incrementos de tiempo más comúnmente utilizados en las computaciones, son de dos semanas o de un mes, de acuerdo al grado de exactitud requerida.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} = \text{caudal promedio de entrada durante el período de tiempo utilizado}$$

$$\frac{O_1 + O_2}{2} = \text{caudal promedio de salida durante el período de tiempo utilizado}$$

Cuando estos dos caudales se multiplican por el tiempo, t , podemos obtener el volumen total de entrada y de salida, respectivamente.

En los términos de entrada o recarga, se deberán incluir todas las posibles afluencias a la unidad hidrológica, el área del proyecto o de una represa, según el caso lo indique. Estos términos incluyen todo el escurrimiento superficial, todo el gasto subterráneo, la precipitación efectiva, el agua importada a la unidad mediante canales, tuberías, etc. En un estudio de operación de embalse, estos términos deberán incluir todo el escurrimiento al embalse, incluyendo el almacenaje en el suelo alrededor de las márgenes de dicho embalse. Igualmente, en los términos de salida o descarga se deberá incluir toda la efluencia superficial - corrientes superficiales y subterráneas, pérdidas por evapotranspiración, etc.

La medición o estimación de estos términos en la ecuación, requiere un programa bastante estricto de las mediciones del escurrimiento. El flujo subterráneo generalmente se estima con la ecuación de Darcy o en algunos casos especiales, mediante la ecuación hidrológica general, la cual se describirá en otro capítulo.

Al seleccionar el intervalo de tiempo, se debe aplicar discreción, ya que si éste es muy largo, se puede introducir un error considerable en la computación y si es muy corto, las computaciones serán muy laboriosas y tediosas. Las computadoras modernas permiten sin embargo, el uso de períodos más cortos de tiempo y en esta forma se aumenta el grado de exactitud.

Ejemplo de un Estudio Simplificado de Operaciones de Embalses

El siguiente ejemplo muestra los datos necesarios y como se efectúan las computaciones en un estudio sencillo de operaciones de un embalse. (Tabla I). A medida que el estudio sea más complejo, se necesitarán más datos. Estos datos se pueden presentar en forma de tablas auxiliares y curvas. Los datos adicionales aumentarían el número de columnas en las tablas. A veces es conveniente añadir columnas a las tablas, para facilitar las computaciones.

TABLA 1

Estudio Simplificado de Operación de un
Embalse de Almacenamiento

Mes y Año	Preci- pita- ción	Evapo- ración	Flujo Acre- pie	Demar- da Acre- pie	Preci- pita- ción, Acre- pie	Evapo- ración, Acre- pie	Demar- da Acre- pie	Almac- enaje, Acre- pie	Almac- enaje, Acre- pie	Area, acres
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
1931										
Dec....	1.062	0.060	3440	100	88	5	40	3383	3383	165
1932										
Jan.....	0.379	0.079	2030	100	72	15	40	1947	5330	215
Feb....	0.390	0.111	4470	130	103	29	40*	4170	9500	315
Mar....	0.042	0.199	96	140	13	62	40	-133	9367	312
Apr....	0.062	0.294	11	250	19	91	11	-322	9045	308
May....	0.018	0.411	11	440	5	125	11	-560	8485	298
June....	0	0.482	0	440	0	140	0	-580	7905	282
July....	0	0.500	0	440	0	138	0	-578	7327	270
Aug....	0	0.450	0	400	0	118	0	-518	6809	256
Sept....	0	0.385	0	370	0	96	0	-466	6343	243
Oct....	0.034	0.252	0	250	8	60	0	-302	6041	235
Nov....	0.066	0.137	0	130	15	32	0	-147	5894	230
Dec....	0.381	0.074	6	100	87	17	6	-30	5864	229
1933										
Jan.....	0.745	0.083	1090	100	182	20	40	1112	6976	260
Feb....	0.100	0.102	33	130	26	26	33	-130	6846	257
Mar....	0.280	0.210	347	140	73	55	40	185	7031	263
Apr....	0.021	0.274	12	250	5	71	12	-316	6715	253
May....	0.155	0.398	11	440	38	98	11	-500	6215	241
June....	0	0.499	3	440	0	116	3	-556	5659	224
July....	0	0.547	0	440	0	119	0	-559	5100	210
Aug....	0	0.465	0	400	0	95	0	-495	4605	198
Sept....	0	0.384	0	370	0	74	0	-444	4161	186
Oct....	0.158	0.240	0	250	29	44	0	-265	3896	179
Nov....	0	0.140	0	130	0	25	0	-155	3741	175
Dec....	0.577	0.079	3	100	101	14	3	-13	3728	174
1934										
Jan.....	0.110	0.080	66	100	19	14	40	-69	3659	173
Feb....	0.455	0.098	332	130	80	17	40	225	3884	178
Mar....	0	0.214	14	140	0	38	14	-178	3706	175
Apr....	0.056	0.266	8	250	10	46	8	-286	3420	168
May....	0.054	0.392	5	440	9	63	6	-495	2925	153
June....	0.046	0.480	0	440	7	70	0	-503	2422	139
July....	0	0.507	0	440	0	68	0	-508	1914	128
Aug....	0	0.450	0	400	0	52	0	-452	1462	103
Sept....	0.079	0.370	0	370	7	34	0	-397	1065	81
Oct....	0.084	0.250	0	250	6	19	0	-263	802	71
Nov....	0.434	0.126	0	130	30	9	0	-109	693	65
Dec....	0.304	0.079	1	100	19	5	1	-86	607	63
1935										
Jan.....	0.755	0.068	1820	100	75	7	40	1748	2355	167
Feb....	0.108	0.088	18	130	15	12	18	-127	2728	135
Mar....	0.491	0.213	1620	140	76	33	40	1483	3711	175
Apr....	0.486	0.258	3680	250	107	57	40	3440	7151	266
May....	0	0.390	23	440	0	100	23	-540	6611	250
June....	0	0.494	8	440	0	120	8	-560	6051	235
July....	0	0.515	1	440	0	117	1	-557	5494	221
Aug....	0.025	0.447	0	400	5	96	0	-491	5003	208
Sept....	0.019	0.360	0	370	4	73	0	-439	4564	197
Oct....	0.065	0.244	0	250	13	47	0	-284	4280	190
Nov....	0.037	0.140	0	130	7	26	0	-149	4131	186
Dec....	0.288	0.068	8	100	53	13	8	-60	4071	184
1936										
Jan.....	0.228	0.074	533	100	43	14	40	422	4493	194
Feb....	0.515	0.080	8970	130	131	20	40†	5007	9500	315

* Mas 204 acre-pies sobre el aliviadero

† Mas 3904 acre-pies sobre el aliviadero.

Precipitación en el Area del Embalse (Columna 2)

Para un embalse de poca extensión, ésto puede incluir la precipitación registrada en un pluviómetro cercano o la precipitación media registrada en varios pluviómetros. Si el área de un embalse es extensa y la precipitación en el área es variable, se considerará la precipitación promedia del área, determinada mediante un procedimiento hidrológico adecuado (método de Thiessen, estación promedio, mapas de isoyetas, etc.) ^{1/}

Espesor de la Lámina de Evaporación de la Superficie de un Embalse (Columna 3)

Esta información generalmente se obtiene de los datos de tanques de evaporación, que se tengan disponibles. Frecuentemente, los únicos datos disponibles provienen de un solo tanque standard tipo A (según modelo del U.S. Weather Bureau). En estos casos, se multiplican los datos del tanque por un coeficiente que varía entre 0,7 y 0,85, a fin de obtener una estimación de la evaporación del embalse. Algunas veces se tienen datos de tanques flotantes de evaporación o de más de un tanque de evaporación tipo A, en dichos casos, es necesario procesar debidamente los datos, antes de usarlos en estimaciones de evaporación de la superficie de los embalses.

Flujo del Agua al Embalse (Columna 4)

El proceso para estimar los datos de esta columna es más bien complejo, cuando se trata de un embalse grande. Las afluencias a éste pueden ocurrir por corrientes superficiales, escurrimiento superficial del área que rodea el embalse, del flujo de entrada de aguas subterráneas provenientes de las formaciones acuíferas y del drenaje de los suelos adyacentes al embalse. Este último proviene de lo que se llama acopio o almacenaje en las riberas.

El flujo de las corrientes superficiales generalmente se afora mediante los procedimientos usuales de medición. El flujo subterráneo se puede es

^{1/}

Linsley, Ray K. Jr., Max A. Kohler y Joseph L.H. Paulhus - "Hidrología para Ingenieros" Mc Graw - Hill Book Co. - pags. 46-52.

Bufler, Stanley S. Engineering Hydrology - Prentice Hall Inc. - pags. 50 51.

timar, aplicando la ley de Darcy, si es que se tienen disponibles suficientes datos geológicos e hidrológicos. La escorrentía superficial usualmente se pasa por alto, debido a que esta cantidad es casi siempre insignificante. El acopio de las riberas es difícil de medir; sin embargo, como éste frecuentemente origina de las filtraciones del embalse y como luego regresa al embalse, la entrada neta a través de un período de tiempo puede resultar insignificante.

Demanda de Agua (Columna 5)

La demanda del agua se expresa como el volumen requerido para el mes. Esta columna puede exigir un estudio amplio, especialmente donde existiendo diferentes usos para el agua y el volumen que se ha de adjudicar a cada demanda se determina mediante estudios económicos y normas de operación que se basan en los resultados de estos estudios económicos.

La curva de demanda para riego, generalmente se deriva de los patrones de cultivo, de los requerimientos de evapotranspiración de los diferentes cultivos y de la aplicación de eficiencias adecuadas de riego. Los requerimientos de lixiviación también se considerarán en esta determinación. Igualmente se deberá determinar en parte, la demanda para las necesidades de energía, industria, navegación, etc.

Volumen de Precipitación que cae en la Superficie del Embalse (Columna 6)

Esta cantidad se obtiene multiplicando el espesor de la precipitación que cae en el embalse, por el área promedio de la superficie del agua durante el mes. Aunque es posible conocer el área de la superficie del agua, al principio del mes, no se conocerá la del fin del mes; esta última cantidad se deberá determinar mediante un sistema de "prueba y error". Las computaciones se continuarán en base a estas estimaciones, computando el valor del área, en el proceso. Si el área computada no coincide aproximadamente con el área estimada, se repetirá el proceso hasta obtener un acuerdo. En estas computaciones se necesita una curva que muestre la relación existente entre la superficie del agua y el volumen de la misma (Vea Figura 1). Se computa el volumen del agua almacenada correspondiente a dife-

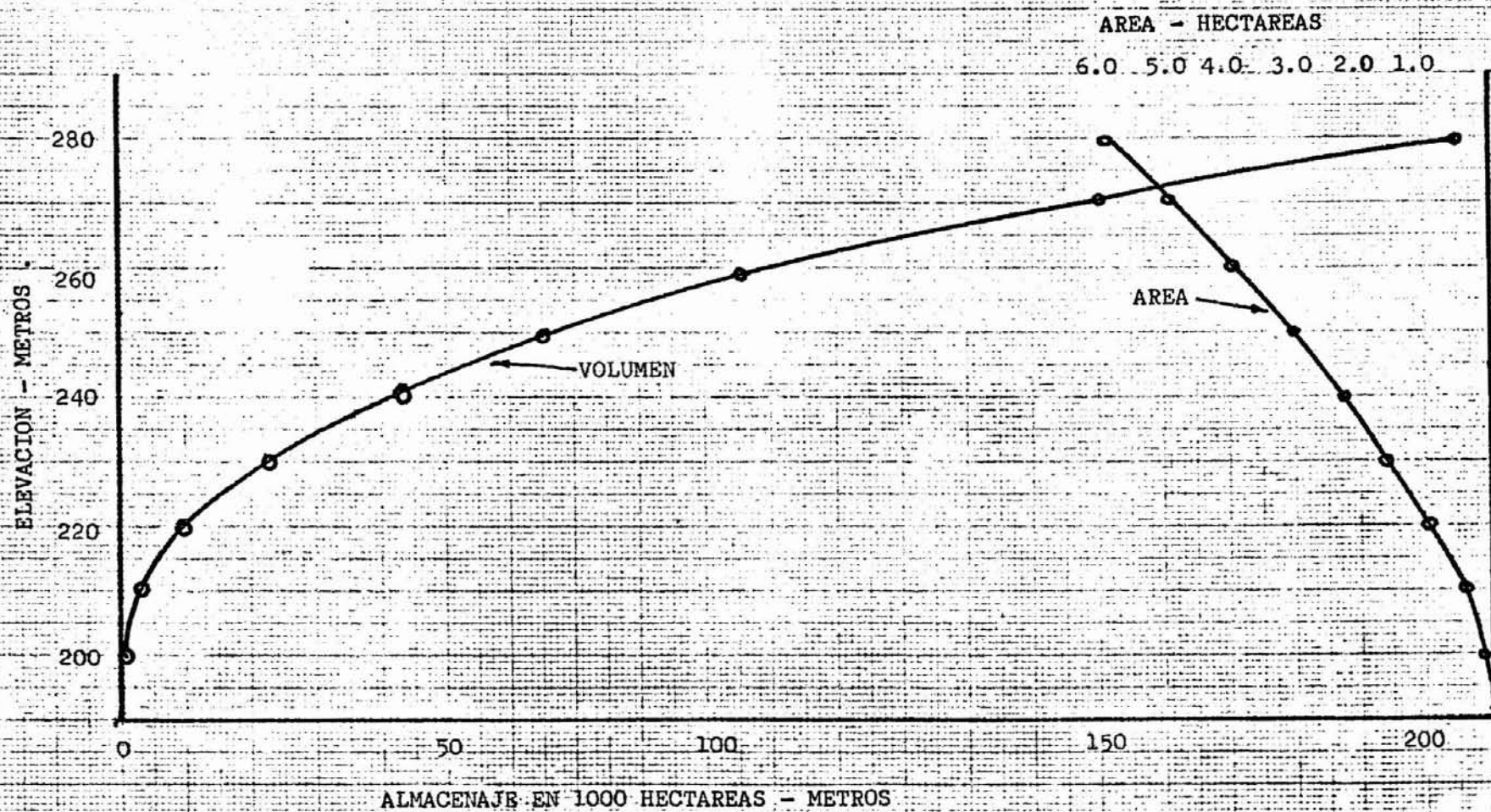


Figura 1.: CURVA DEL AREA - CAPACIDAD PARA EL EMBALSE DE BOCONO.

TABLA 2

DATOS DEL AREA

CAPACIDAD PARA EL EMBALSE DEL RIO BOCONO

Elevación (Metros)	Area (Hectáreas)	Volumen de Almacenamiento Hectáreas - Metros
195	0	0
200	100	300
210	500	3,100
220	1,150	10,000
230	1,700	22,500
240	2,350	43,700
250	3,200	66,700
260	4,100	106,200
270	4,950	150,000
280	5,950	205,000

rentes elevaciones, con la ayuda de mapas topográficos y el uso de la fórmula prismoidal. Para fines preliminares, puede ser suficientemente exacto, el determinar el volumen multiplicando las áreas promedios por la distancia vertical entre estas áreas. Las áreas se pueden medir con un planímetro o a través de algún otro método aceptable.

Volumen de Evaporación del Embalse (Columna 7)

Esta cantidad se determina multiplicando el área promedio del embalse según se determinó mediante computaciones en la columna 6- por el espesor de la evaporación en la columna 3. Esta cantidad puede requerir ajustes, si el área supuesta no está de acuerdo con el área computada.

Volumen de la Descarga del Embalse (Columna 8)

Este volumen se puede determinar por las mediciones del agua. Puede que sea igual o diferente a la demanda, de acuerdo a las normas de operación o a decisiones del personal administrativo del proyecto.

Cambios en Almacenaje (Columna 9)

El cambio en el almacenaje es igual a la suma de los valores en las columnas 4 y 6, menos la suma de los valores en las columnas 5, 7 y 9.

Almacenaje al Final del Mes (Columna 10)

El almacenaje al final del mes es igual al almacenaje del mes anterior, más el cambio en el almacenaje (Columna 9) durante el mes. Por ejemplo :

De la Tabla 1, el almacenaje al final de Dic. 1932	=	5864
Cambio de almacenaje en Enero de 1933	=	<u>1112</u>
Almacenaje al final de Enero	=	6976

Area de la Superficie del Agua (Columna 11)

Conociendo el volumen computado, podemos trazar una curva (como la que se muestra en la Fig. 1) y determinar el área del embalse. Esta área debe coincidir con el área estimada; de lo contrario, se volverá a estimar el área y se continuará repitiendo el proceso hasta que coincidan.

Consideraciones de un Estudio de Operaciones

En el anterior estudio, el volumen más bajo en almacenamiento se obtuvo al final de Diciembre de 1934 (el año de 1934 fué un año de gran sequía en el occidente de los Estados Unidos). Así, el estudio muestra que el embalse podía suministrar la demanda estimada durante un año de sequía extrema y retener aún una reserva de 607 acre-pies. Si el embalse contenía peces de valor comercial o para fines recreativos, posiblemente no hubiera convenido haberlo drenado; de lo contrario se hubiese podido haber extendido aún más el uso del agua.

En Febrero de 1932, el embalse se rebozó. Si el embalse de almacenamiento hubiera tenido una capacidad de 9700 acre-pies en vez de 9500 acre-pies, se hubiera podido almacenar para uso en el futuro, el agua que se desfegó por los aliviaderos. Estas observaciones muestran algunas de las utilidades de estos estudios de operaciones.

El estudio de operaciones de un embalse sirve para resolver las siguientes interrogantes :

1.- Teniendo capacidad adecuada de almacenaje ¿qué extensión (área) se puede regar con el abastecimiento disponible?

2.- Conociendo la extensión (área) que se ha de regar, ¿qué capacidad de almacenaje se requiere para satisfacer la demanda de agua durante una serie de años secos?

3.- Teniendo una norma de operación como la siguiente : "En años de sequía, el proyecto tratará de suministrar el 80% de la demanda". ¿Qué capacidad de almacenaje se requerirá?

4.- ¿Qué combinación de demandas de agua, capacidad de embalse y normas de operación rendirán los beneficios máximos, de los recursos hidráulicos disponibles?

Para resolver estos problemas será necesario hacer un estudio económico, pero el estudio hidrológico provee en parte, las bases para el estudio económico.

Los estudios de operación son útiles también, para encontrar las inconsistencias en las operaciones, determinar la gravedad de períodos extensos de sequía y la necesidad de datos hidrológicos adicionales para lograr mejores prácticas de operación.

Para lograr estas soluciones se pueden requerir varios estudios de operaciones, a fin de encontrar las mejores alternativas para un desarrollo hidráulico propuesto. El plan económicamente más aceptable, no siempre es el que satisface toda la demanda de agua, todo el tiempo.

El almacenaje no tiene que estar limitado a la superficie. En algunas situaciones los depósitos de aguas subterráneas resultan más adecuados que los superficiales. Sin embargo, para lograr esto se requieren muchos datos geológicos e hidrológicos que permitan incluir los depósitos subterráneos en los estudios de operaciones. Las economías que se pueden realizar mediante el uso de los depósitos subterráneos, justifican con creces, el gasto de obtención de los datos adicionales necesarios.

Traducido por : Lucía de Martínez

/lus