Evaluación Económica del Cambio de Operación de un Embalse debido a la Sedimentación

Por: José Medardo Prieto Suárez. I.E., M. Sc.[1]

RESUMEN

Se presenta una metodología sencilla para evaluar el efecto económico del cambio de operación de un embalse cuando se ha observado que la tasa de sedimentación promedia es superior a aquella que se había estimado en la fase de diseño del proyecto. La metodología contiene elementos básicos de i) ingeniería económica ii) optimización y simulación de la operación de embalses y iii) cálculo elemental. Permite determinar el año en el que debe tomarse la decisión de modificar la operación para evitar transportar los sedimentos hacia la bocatoma. Se aplica el caso del embalse de La Esmeralda de la central hidroeléctrica de Chivor.

1. INTRODUCCION

En algunas ocasiones ocurre que la tasa de sedimentación real de un embalse que está en operación se muestra superior a la que fue estimada durante la fase de estudios del proyecto (ver por ejemplo ISA 1986). Como generalmente los embalses se construyen con un "volumen muerto" suficiente para almacenar los sedimentos durante la vida útil de diseño, la presencia de una tasa mayor compromete dicha vida útil y generalmente conduce a tomar medidas restrictivas sobre la operación del embalse. Una de tales medidas consiste en evitar desembalsamientos extremos, los cuales favorecen el ingreso rápido de sedimentos hacia las zonas próximas a las bocatomas e inducen procesos erosivos en las laderas adyacentes.

En este artículo se desarrolla una metodología que permite estudiar la conveniencia económica de limitar la cota mínima de operación de un embalse a un valor específico a partir de un período determinado. Se utilizan elementos de ingeniería económica para tener en cuenta que los beneficios de la operación se perciben en períodos de tiempo distintos. También se hace uso de herramientas de optimización y simulación para encontrar la operación óptima (i.e., los mayores beneficios) del embalse con y sin la restricción. Y finalmente, se utilizan algunas nociones básicas del cálculo elemental sobre puntos de máxima de funciones analíticas.

El hecho de limitar el desembalsamiento a una cota superior a la de diseño conduce a prolongar la vida útil con los consecuentes beneficios en el largo plazo. Sin embargo, esta restricción implica perder producción firme anual en especial en los períodos hidrológicos secos. En consecuencia, se presenta el problema de decidir el momento a partir del cual debe realizarse el cambio, cuya solución está en el análisis de los beneficios durante toda la vida útil del embalse.

2. METODOLOGIA

Denomínese operación actual (OA) a la obtenida sin la restricción en el desembalsamiento. Corresponde a la operación óptima para la cual se diseñó el embalse y que se ha venido realizando desde su entrada en operación. Alternativamente, entiéndase por operación nueva (ON) la resultante de aplicar la restricción para controlar la forma como se depositan los sedimentos.

2.1 Definición de Variables

B: Beneficios anuales de la OA

N: Vida útil restante del embalse (en años) si se mantiene la OA.

t: Año a partir del presente en el que se toma la decisión de comenzar la ON. Obsérvese que el intervalo de interés de t es $0 \leq t \leq N$.

a: Fracción de B que se obtiene con la ON. Si a = 0.8, la ON conduce a una pérdida del 20% de los beneficios actuales. $0 < a < 1$.

---

1. Oficina de Planeación. Interconexión Eléctrica S.A. - ISA.
Las apreciaciones y comentarios aquí expresados son responsabilidad exclusiva del autor.

M (t): Número de años en que se prolonga la vida útil debido al cambio de operación. Evidentemente es función de t. Si t = 0, M (t) = m representa la máxima prolongación de la vida útil que se podría obtener.

b: Fracción de B que se obtiene después de agotada la vida útil del embalse muerto ($0 \leq b \leq a$). Si b = 0 el aprovechamiento no genera más beneficios. Si b > 0 el embalse puede seguir generando beneficios pero seriamente disminuidos por la colmatación (por ejemplo haciendo una operación a filo de agua con el embalse totalmente lleno para controlar los sedimentos).

r: Tasa anual de descuento.

La función M (t) es decreciente ya que entre más tarde se tome la decisión de cambiar la operación (t grande), menor será la prolongación de la vida útil del embalse muerto (M pequeño). Por simplicidad, supóngase que M (t) es lineal:

$$M(t) = m - (m/N)\,t \qquad 0 \leq t \leq N \qquad (1)$$

Obsérvese que M (0) = m y M (N) = 0. Esta suposición de linealidad puede modificarse fácilmente sin que introduzca mayores complicaciones.

Una vez colmatado el embalse muerto en cualquiera de las dos alternativas, se considera que deberá hacerse una operación a filo de agua para evitar el transporte de sedimentos hacia la captación.

2.2 Planteamiento del problema

Defínanse las siguientes dos alternativas:

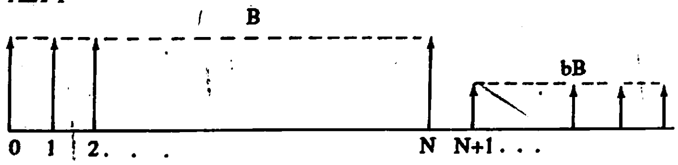
ALT1: Seguir la OA hasta agotar el volumen muerto que falta por colmatar.

ALT2: Seguir la OA hasta el año t a partir del cual se inicia la ON. Obsérvese que t = 0 significa cambiar la operación a partir del presente y t = N conduce de nuevo a ALT1. Nótese además que en realidad cada t define una alternativa distinta a confrontar con ALT1.

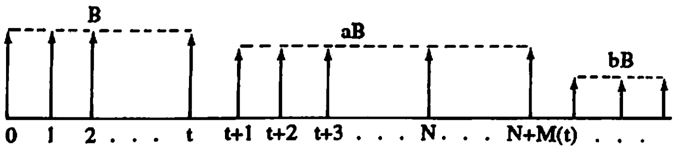
El problema consiste en identificar cuál de las alternativas (cuál t) presenta los mayores beneficios. Se configura un problema de decisión en el que sólo interesa lo que sucederá en el futuro y no lo que ha sucedido en el pasado.

Consecuentemente, los "flujos de caja" correspondientes son:

ALT 1

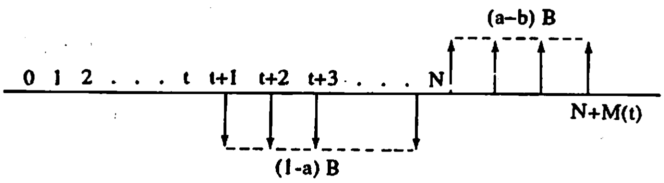


ALT 2



2.3 Regla de decisión

Como las alternativas son excluyentes, para determinar cuál de ellas es mejor basta considerar la alternativa diferencial (Arboleda 1982). Su flujo se obtiene como la diferencia de los dos flujos originales. Dicho flujo (ALT2 - ALT1) es el siguiente:



Con este flujo diferencial puede obtenerse la regla de decisión. Tomando N como año de referencia para el valor presente se calcula la siguiente diferencia:

$$(a-b)\,B < P/A, r, M(t) > - (1-a)\,B < F/A, r, N-t > \qquad (2)$$

donde $< P/A, r, n >$ y $< F/A, r, n >$ son respectivamente los factores para convertir una serie constante de n períodos a valores presente y futuro, a la tasa r.

Ya que la comparación se hace contra cero, el factor B en (2) se puede simplificar convirtiéndose en:

$$D(t) = (a-b) < P/A, r, M(t) > - (1-a) < F/A, r, N-t > \qquad (3)$$

entonces la regla de decisión es:

Si D (t) < 0 óptese por ALT1
Si D (t) > 0 óptese por ALT2
Si D (t) = 0 hay indiferencia (4)

Es interesante notar que D (t) sólo depende de a y b (i. e. la pérdida de beneficios) y no de los beneficios absolutos del embalse.

2.4 Período t* en que debe tomarse la decisión

La diferencia (3) es una función de t y se puede expresar en forma explícita utilizando (1) y las fórmulas de los factores de descuento. Así,

$$D(t) = (a-b)\left[\frac{(1+r)^{m-mt/N} - 1}{r\,(1+r)^{m-mt/N}}\right] - (1-a)\left[\frac{(1+r)^{N-t}-1}{r}\right] \quad (5)$$

En consecuencia, se desea obtener t tal que D (t) sea máximo. Dicho t corresponde al año en que debe decidirse cambiar de operación para maximizar los beneficios durante toda la vida útil restante.

Haciendo uso del cálculo elemental (ver Anexo), el t óptimo, denotado por t*, resulta ser

$$t^* = \frac{\ln\left[\dfrac{N\,(1-a)\,(1+r)^{N+m}}{m\,(a-b)}\right]}{\ln\,(1+r)^{1+m/N}} \quad (6)$$

2.5 Otras alternativas de interés

A pesar de que la alternativa correspondiente a t* es la óptima, existen otras que son mejores que ALT1. Corresponden a valores de t superiores a un t° de indiferencia para el cual (5) satisface:

$$D(t) = 0 \quad (7)$$

Después de algunas simplificaciones (7) toma la forma (ver Anexo):

$$C_1\,Y + C_2\,Y^{-m/N} - C_3 = 0 \quad (8)$$

donde

$$C_1 = (1-a)\,(1+r)^N$$
$$C_2 = (a-b)\,(1+r)^{-m}$$
$$C_3 = 1-b$$
$$Y = (1+r)^{-t}$$

La ecuación (8) no tiene solución explícita para Y y debe emplearse un método numérico para resolverla. Una vez obtenido Y, t° se calcula como:

$$t^\circ = \frac{\ln\,(1/Y)}{\ln\,(1+r)} \quad (9)$$

exigiéndose $0 \leq t^\circ \leq N$

2.6 Valor presente de los beneficios netos (VPN)

E VPN de una alternativa de cambiar la operación a partir de un t cualquiera está dado por

$$VPN(t) = B\,D(t)\,\langle P/F, r, N\rangle \quad (10)$$

donde D (t) está dado por (3) y <P/F, r, n> es el factor de descuento en n períodos de una cantidad futura.

3. APLICACION

En 1985 se realizó un estudio sobre la sedimentación del embalse La Esmeralda de la central hidroeléctrica de Chivor, encontrándose una tasa de sedimentación del embalse muerto de 2.3 Mm^3/año, un 28% superior a la de diseño (ISA 1986). Como solución se planteó limitar los desembalses de la cota 1196 (la mínima de diseño) a la 1220 msnm, resultando una pérdida de volumen útil para regulación del orden del 23%.

De mantenerse la OA, los 66.4 Mm^3 de embalse muerto que aún quedaban por colmatar se agotarían en N = 28.9 años. Sin embargo, con la restricción la tasa se reduciría a 1.7 Mm^3/año, y la vida útil se prolongaría a un valor máximo de m = 10.2 años (para t = 0).

3.1 Operación Optima

Los valores de B, a y b se obtuvieron mediante el cálculo de los beneficios económicos de la operación óptima a las cotas 1196, 1220 y 1277 msnm, siendo esta última la correspondiente a una operación a filo de agua con embalse totalmente lleno. Las políticas óptimas de operación se determinaron con un modelo que combina reglas heurísticas de optimalidad y simulación Montercarlo (ISA y otros 1978), alimentado con series sintéticas extensas de los ríos que hacen sus aportes al embalse. Como criterio de firmeza se utilizó el 95% de confiabilidad y los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1. El cambio en la potencia confiable no se tuvo en cuenta debido a la poca magnitud que representa con respecto a la generación de energía (la central posee una caída topográfica mucho mayor que la variación de cabeza en el embalse).

En la Tabla 1, la producción ponderada (P) se obtiene de aplicar factores de peso a la generación firme de verano (E_{fv}) e invierno (E_{fI}), a la secundaria (E_s) y al déficit (R), de tal forma que reflejen el valor económico de estos recursos. Es decir,

$$P = f_1 E_{fv} + f_2 E_{fI} + f_3 E_s - f_4 R \qquad (11)$$

Los factores provienen de un análisis de los costos marginales de la generación del Sistema Eléctrico Colombiano ($f_1 = 1.871$; $f_2 = 0.378$; $f_3 = 0.106$; $f_4 = 4.311$).

Entonces, i) B = 3443CM. siendo CM el costo marginal promedio anual de la generación, ii) a = 3008/3443 = 0.874 y iii) b = 1114/3443 = 0.324.

TABLA 1

Operación óptima. Desembalsamientos máximos a distintas cotas

Generación (GWh)		Cota (msnm)		
		1196	1220	1277
Firme	Verano	1420	1183	175
	Invierno	1829	1790	1341
	Anual	3249	2973	1516
Secundaria	Verano	2	4	396
	Invierno	1092	1314	2279
	Anual	1094	1318	2675
Media	Verano	1422	1187	571
	Invierno	2921	3104	3620
	Anual	4343	4291	4191
Déficit anual		5	5	1
Producción ponderada		3443	3008	1114

3.2 Resultados

La Figura 1 presenta, para distintas tasas de descuento, la evaluación económica de la alternativa de realizar el cambio de operación a partir del presente (i.e. para t = 0). Se aprecia que para valores realistas de r (valores entre el 6% y 12%) domina ALT1, es decir, seguir con la operación actual hasta agotar el embalse. La Tabla 2 muestra que el VPN a favor de ALT1 estaría entre 86.9 y 97.5 millones de US$ de diciembre de 1986.

La Figura 2 presenta la función D (t) parametrizada por distintas tasas r. Los valores de t* para los cuales la función es máxima corresponden al año óptimo para comenzar la nueva operación. Los cortes con el eje de las abscisas indican el período t° de indiferencia entre ALT1 y ALT2. La Tabla 2 incluye los valores de t* y t° y el VPN (t*) para las distintas tasas. La Figura 3 exhibe el comportamiento de t* y t° para un rango amplio de tasas de descuento.

Finalmente, la Figura 4 muestra la forma como t* depende de la tasa de sedimentación para distintos valores de la tasa de descuento. Entre mayor sea la tasa de sedimentación más pronto habrá que realizarse el cambio de operación.

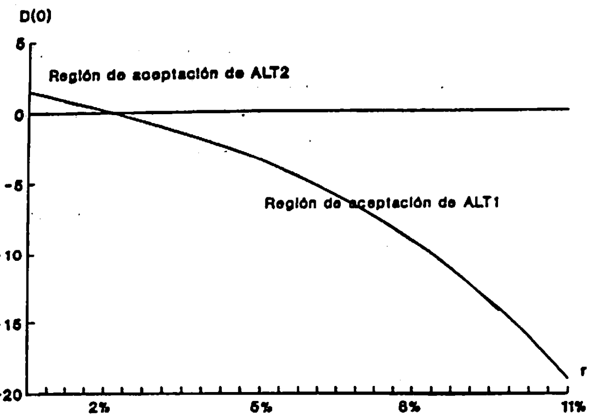


FIGURA 1. D(O) vs. tasa de descuento.

TABLA 2

Evaluaciones económicas de distintas alternativas de cambios de operación

Tasa r .%	Cambio desde hoy D (0)	VPN (0) MUS $	Cambio óptimo t* años	D (t*)	VPN (t*) MUS$	Indiferencia t° años
6	- 5.11	- 92.3	23.4	0.187	3.38	18.3
8	- 9.25	- 97.5	24.8	0.140	1.48	20.9
10	- 15.11	- 93.7	25.6	0.112	0.69	22.4
12	- 23.58	- 86.9	26.1	0.093	0.34	23.4

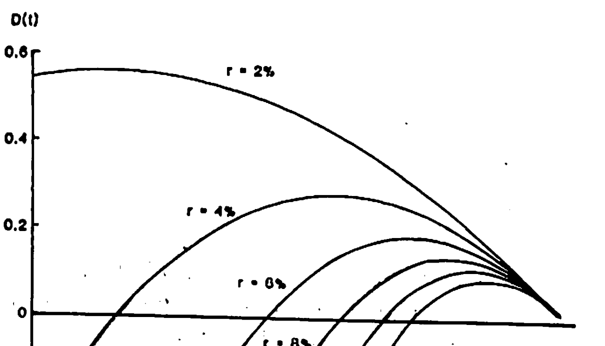


FIGURA 2. D(t) vs. t. para varias tasas de descuento.

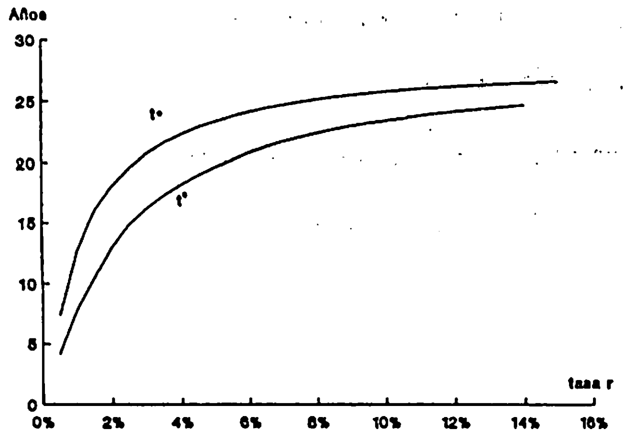


FIGURA 3. Tiempos t^* y t^o vs. r.

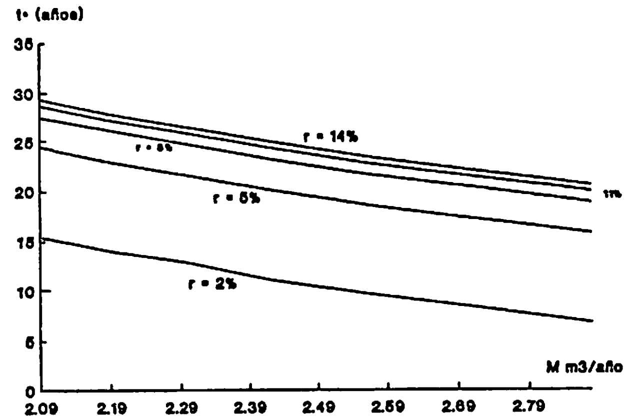


FIGURA 4. Tiempo t^* vs. tasa anual de sedimentación.

4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Se ha desarrollado una metodología sencilla para evaluar la conveniencia económica de restringir, a partir de un momento determinado, la operación de un embalse hasta una descarga específica, por problemas de sedimentación. Las variables que determinan el año óptimo para el cambio de operación son: i) la tasa de sedimentación actual y el volumen que aún queda por colmatar, los cuales definen los valores de N y m, ii) la pérdida de beneficios originada por la nueva operación (valor de a) y los beneficios posteriores a la colmatación total (valor de b) y iii) la tasa de descuento r.

Debe destacarse que cuando el embalse pertenece a un sistema interconectado, como es el caso de Chivor, es posible encontrar alternativas menos severas que la de restringir definitivamente los desembalsamientos y posiblemente más ventajosas que la de seguir con la operación actual. Por ejemplo, una de tales alternativas podría ser que en años húmedos se asigne una mayor producción que la garantizada al resto de aprovechamientos y una menor al embalse con problemas de sedimentos. Esto posiblemente conduciría a concentrar los vertimientos totales del sistema en el embalse pero ayudaría a controlar su sedimentación en dicho año. Por el contrario, en períodos hidrológicos críticos se permitiría realizar la operación sin restricciones. Evidentemente, este tipo de alternativas exige el establecimiento de contratos especiales entre las empresas propietarias de los desarrollos de recursos de agua.

RECONOCIMIENTOS

El autor expresa sus reconocimientos al ingeniero Carlos Saldarriaga Toro de Interconexión Eléctrica S.A., por su colaboración en la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

ISA. Central Chivor. Informe sobre la Sedimentación del Embalse La Esmeralda durante el período 1975-1985. Documento ABRNC-112. Medellín, Septiembre, 1986.

ARBOLEDA, Benjamín. Ingeniería Económica - Métodos para el Análisis de Alternativas de Inversión. Segunda Edición. Medellín. ASIDUA. 1982. 502 p.

ISA, DNP, FONADE y Consultores Unidos Ltda. Investigación de Reglas de Operación de Embalses - Método Heurístico. Informe Final. Bogotá, Abr., 1978.

ANEXO

1. CALCULO DE dD (t) / dt = 0 (primera condición de máximo)

La ecuación (5) se puede expresar como

$$D(t) = A_1 - A_2 (1 + r)^{mt/N} - A_3 (1 + r)^{-t} \qquad (A.1)$$

donde:

$$A_1 = (1 - b) / r \; ; \; A_2 = (a - b) / [r (1 + r)^m] \; ;$$
$$A_3 = [(1 - a)(1 + r)^N] / r$$

son cantidades que no dependen de t.

Recordando que la derivada de la función exponencial a^{bx} es $a^{bx}\, b\, (\ln a)$ se llega a:

$$dD(t) / dt = - A_2 (1 + r)^{mt/N} (m/N) \ln (1 + r) +$$
$$A_3 (1 + r)^{-t} \ln (1 + r)$$

y al igualar a cero se obtiene:

$$(1 + r)^{t^* (1 + m/N)} = (N A_3) / (m A_2)$$

t* se consigue tomando logaritmos naturales en ambos lados con el resultado dado en (6).

Para comprobar que t* es máximo se calcula la segunda derivada.

$$d^2D\ (t) / dt^2 = - A_2 (1 + r)^{mt/N} (m / N)^2 \ln^2 (1 + r) -$$
$$- A_3 (1 + r)^{-t} \ln^2 (1 + r)$$

que es negativa para todo valor de t.

2. ECUACION (8)

Nótese que en el segundo término de (A.1).

$$(1 + r)^{mt/N} = [(1 + r)^{-t}]^{-m/N}$$