

- Doorembos, J. y W.O. Pruit. "Les Besoins en Eau des Cultures". Bulletin D'irrigation et de Drainage 24, F.A.O., Roma, 1976.
- Espíldora, B. y G. Palma. "Modelo de Simulación Hidrológica en la Cuenca del río Elquí". Centro de Recursos Hidráulicos, Depto. Ingeniería Civil. CRH 77-4-I, 1977.
- Falcón E., O. Castillo y M. Valenzuela. "Hidrogeología de la Cuenca de Santiago." Instituto de Investigaciones Geológicas. Div. Recursos Hidráulicos. CORFO, 1970.
- Ferrer P., E. Brown y L. Ayala. "Simulación de Gastos Medios Mensuales en una Cuenca Pluvial". II Coloquio Nacional Soc. Chilena de Ingeniería Hidráulica, 1973.
- IPLA-Dirección General de Aguas. M.O.P. "Estudio de Aguas Subterráneas de Santiago", 1974.
- Narbona, J. "Simulación del Sistema de Riego en el río Copiapó". Memoria de título de Ingeniero Civil. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, U.de Chile, 1973.
- Silva, O. "Estudio de las Recuperaciones del río Maipo". Memoria de Título de Ingeniero Civil. Fac. de Ciencias Físicas y Matemáticas, U. de Chile, 1976.

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA

V CONGRESO NACIONAL

EVALUACION DEL USO ADICIONAL DE UN EMBALSE DE RIEGO

PARA CONTROL DE CRECIDAS

I METODOLOGIA GENERAL

Luis Arrau del Canto (1)

Enrique Kaliski Kriquer (2)

RESUMEN

Se presenta una metodología desarrollada con el objeto de analizar la incidencia que tiene en el regadío, el uso adicional para el control de crecidas de un embalse de riego.

El análisis se realiza básicamente en términos económicos, evaluando el beneficio neto esperado en el largo plazo de la operación de la obra para ambos usos.

La obtención de los beneficios esperados por concepto de riego, debido al uso de una parte del volumen del embalse para el control de crecidas, se realiza a través de un modelo de simulación mensual, que incorpora como variables la capacidad útil del embalse para almacenar agua de riego en los diferentes meses del año.

La obtención de los beneficios esperados provenientes del control de crecidas, se realiza a través de un tratamiento matemático a una serie de datos de terreno relacionados con los daños que producen las inundaciones correspondientes a crecidas de diferentes períodos de retorno. Estas inundaciones se definen de acuerdo a las características del embalse, de la caja del río y de las crecidas.

(1) Ingeniero Civil. Jefe de Proyectos Sist. Paloma, Direc. Riego

(2) Ingeniero Civil. Departamento de Estudios, Dirección de Riego

1. INTRODUCCION

En los últimos años ha tomado gran auge en el mundo entero, el uso múltiple de las presas, de los cuales uno es el control de crecidas. Este uso permite almacenar en el embalse los grandes afluentes para disminuir los daños que se producirían principalmente aguas abajo de la presa. Las razones del auge del control de crecidas son diversas, destacándose entre otras, las catástrofes que se han producido en algunos países.

Los resultados de una revisión de las características de la operación de algunos embalses de la Dirección de Riego, han indicado la necesidad de realizar estudios que cuantifiquen la conveniencia de destinarlos además, para el control de crecidas.

El propósito de este trabajo es desarrollar una metodología de evaluación del uso adicional de un embalse de Riego para control de crecidas, y justificar su conveniencia. Esta metodología incluye las principales características de los sistemas de riego chilenos, y posee la generalidad suficiente para hacerla independiente de las condiciones particulares del embalse y de situaciones coyunturales.

En consecuencia, la aplicación de la metodología a cada caso particular requerirá de una serie de adaptaciones y supuestos básicos, para suplir la falta de información adecuada que generalmente existe en este tipo de sistemas.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El control de crecidas en un embalse consiste generalmente en destinar una parte de su capacidad útil, durante un cierto período del año, como reserva para almacenar la totalidad o parte del volumen de una crecida, y así amortiguar sus efectos tanto en la obra como aguas abajo de ella.

Si un embalse ha sido diseñado originalmente para fines de riego, el uso adicional para crecidas puede implicar una disminución, tanto en la cantidad de agua entregada, como en la seguridad de realizarla todos los años y, por lo tanto, producir menos beneficios debido al riego. Por otra parte, los daños que se producirían aguas abajo de la presa debido a la evacuación de una crecida, podrían en gran medida evitarse, si al comenzar un evento de crecidas, el embalse dispone de un volumen de reserva para controlarlo.

El control de crecidas otorga además, un beneficio adicional relacionado con la mayor seguridad de la presa, al considerar que el vertedero podrá evacuar crecidas de recurrencia menor a la de su diseño original.

Considerando que la decisión de controlar crecidas tiene otros efectos derivados, tales como menores fuentes de trabajo si disminuye la agricultura y otros, se concluye que la mayor complejidad del problema consiste en que es necesario compatibilizar intereses de diverso tipo y origen. En efecto, hay que conjugar criterios generales, de tipo económico a nivel global de la cuenca, con aspectos de decisión específicos, muchas veces subjetivos y difíciles de evaluar.

La metodología que se presenta, tiene por objetivo aprovechar al máximo posible la información que para cada caso se pueda disponer, entre gando una serie de resultados relevantes que pueden ser utilizados como elementos de decisión por los organismos correspondientes.

Como una forma de independizarse de aspectos subjetivos y/o de oportunidad, se desarrolla el procedimiento de manera que sea posible tomar la decisión de controlar crecidas, sólo sobre la base de los efectos económicos probables de esperar en el largo plazo.

3. DESCRIPCION GENERAL DE LA METODOLOGIA

En la figura N° 1 se muestra el diagrama de bloques correspondiente a la metodología propuesta para la elección de las alternativas óptimas de operación. Se observa que está basada en un modelo de simulación, del cual es posible obtener los beneficios esperados en cada caso, así como una serie de antecedentes a considerar según sean las políticas y criterios generales de la operación.

El Sistema global, a nivel de la cuenca, comprende todos aquellos factores que son causa o efecto, tanto directo como indirecto, de la utilización de un embalse de Riego en forma adicional para el control de crecidas.

De acuerdo a las características de estos factores, se ha dividido el Sistema en cinco subsistemas: administrativo, agroeconómico, físico, operacional e hidrológico.

- 3.1. Subsistema Administrativo: está integrado por la Dirección de Riego, encargada de administrar las grandes obras, y las Organizaciones de Regantes, que efectúan las distribuciones del agua a nivel predial. Estos organismos, son generalmente los responsables de la toma de decisiones respecto de la operación de las obras en cada temporada, y a través de ellos se deben considerar todos los aspectos subjetivos relacionados con la operación.
- 3.2. Subsistema Agroeconómico: está directamente relacionado con los ingresos agrícolas; se incluyen los tipos, distribuciones y rotaciones de cultivos, precios, rendimientos, costos agrícolas, tasas de riego, y en general todos aquellos factores agrícolas y de mercado, que permiten evaluar los ingresos en función del agua disponible para el riego.
- 3.3. Subsistema Físico: corresponde básicamente a la infraestructura de terreno, tanto relacionada con el riego, como la de otro tipo que puede ser afectada por las inundaciones que provocan las crecidas. Se incluyen el embalse, los ríos, red de canales con su capacidad y eficiencias de conducción, tipos de suelos, zonas de riego, zonas de inundación, mecanismos de distribución del agua a nivel predial, etc.
- 3.4. Subsistema Operacional: corresponde fundamentalmente a las características de diseño de la obra desde el punto de vista de su operación, en especial los criterios básicos relacionados con las entre

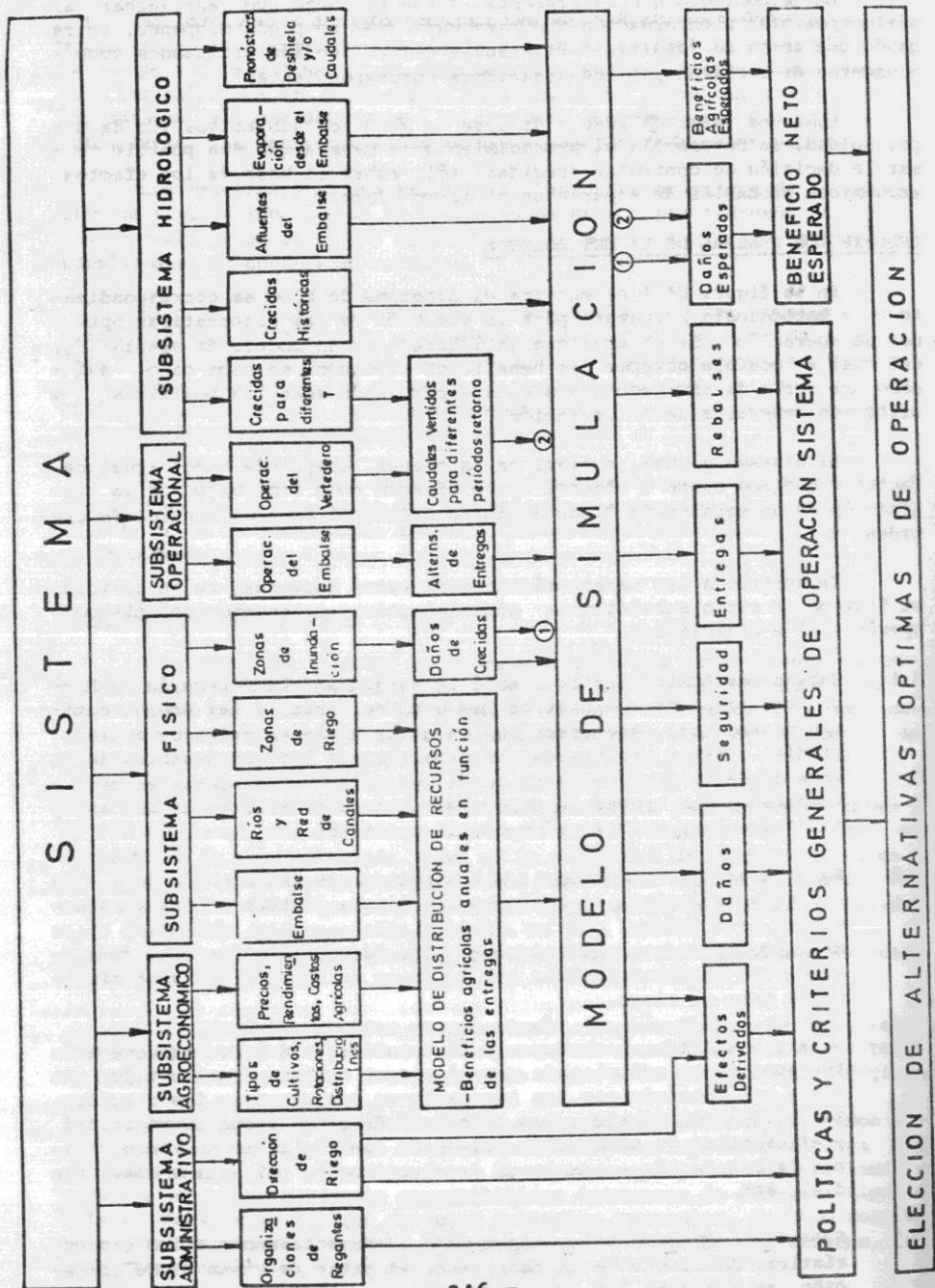


FIGURA N°1

gas del embalse y las reglas de operación de las compuertas del vertedero, o curva de descarga.

3.5. Subsistema Hidrológico: está relacionado con los recursos de agua del sistema; se incluyen los estudios de las potenciales crecidas y afluentes mensuales al embalse, los registros de crecidas históricas, la evaporación desde el embalse, los eventuales modelos de pronósticos que pudieran existir, ya sea de caudales mensuales o de deshielo, etc.

Una vez que se dispone de la información relevante de cada uno de los subsistemas definidos, se realizan los estudios indicados en la fig. 1, que finalmente permiten aplicar el modelo de simulación.

Estos estudios comprenden:

- la confección de un modelo de distribución de recursos, que permita obtener los beneficios agrícolas anuales en función de las entregas.
- Un estudio de la caja del río que permita evaluar los daños para diferentes caudales.
- un análisis de los criterios básicos de operación. En el caso general de los embalses de Riego, se propone analizar reglas de operación que cumplan con los siguientes requisitos básicos de seguridad:
 - La Meta de Entrega se debe cumplir en el 85% de los años
 - En el resto de los años las entregas deben estar comprendidas entre una meta mínima y la meta de entrega, excepto en casos de extrema sequía, con probabilidades de ocurrencia inferiores a un 1%.
- un estudio hidrológico de las potenciales crecidas afluentes al embalse en conjunto con las leyes de operación del vertedero, o curva de descarga, que permita obtener los caudales vertidos para diferentes períodos de retorno.

Los principales resultados que se pueden obtener del modelo son los beneficios esperados según las reglas de operación y el volumen de reserva para controlar crecidas. Adicionalmente, es posible deducir los rebalses ocurridos en cada año, las entregas máximas durante la simulación, la seguridad de riego, los daños ocurridos en la simulación, y otros efectos derivados, tales como pérdidas agrícolas en años de déficit, oportunidad de mano de obra, etc. Los daños esperados se obtienen de un análisis estadístico aplicado a un catastro de daños provocados por crecidas con diferentes períodos de retorno.

4. Desarrollo y Obtención del Beneficio Neto Esperado.

Se desarrolla a continuación la metodología propuesta, en forma simplificada para el caso de una toma de decisiones desde un punto de

vista netamente económico.

4.1. Análisis Simplificado y variable de decisión.

La evaluación de los efectos del riego y del control de crecidas en términos económicos, según la metodología planteada, se puede representar mediante el esquema de la fig. N° 2, en la cual los efectos se cuantifican a través de los valores matemáticos esperados del beneficio agrícola anual y de los daños de crecidas. Se estima que estas magnitudes representan un valor promedio de las respuestas del embalse y son independientes de la aleatoriedad de los recursos hidrológicos anuales y de eventuales coyunturas.

En consecuencia, se define como Beneficio Neto Esperado, (BNE), a una magnitud que representa el efecto conjunto del riego y control de crecidas, como promedio en el largo plazo, y que se determina como:

$$BNE = BAE - DE \quad (1)$$

en que: - BAE es el Beneficio Agrícola Esperado.

- DE es el Daño Esperado.

Gráficamente, la situación queda representada por las curvas de la figura N° 3.

4.2. Obtención del beneficio agrícola esperado (curva 3a de la fig. N° 3).

La obtención del BAE en función del volumen de reserva para control de crecidas (V_R), se realiza a través de un modelo de simulación, que a su vez requiere de un modelo previo de distribución de recursos. La figura N° 4 indica las curvas que son posibles de obtener con estos modelos, a partir de las cuales se determina el BAE.

4.2.1. Relación entre Beneficios Agrícolas y Entregas anuales del embalse (curva 4a) de la fig. 4).

Para determinar una relación, gráfica o analítica, entre los Beneficios Agrícolas y las entregas anuales de agua del embalse, se plantea un modelo de distribución de los recursos a cada zona de riego, que permite evaluar la producción agrícola de cada sector. Este modelo define para diferentes volúmenes entregados anualmente la forma de distribución de los recursos, de acuerdo a criterios establecidos a priori. Se propone analizar con el modelo los dos casos siguientes:

a) Situación en que el agua se distribuye a las respectivas zonas de riego según las normas de los organismos administradores correspondientes; la superficie que tiene cada cultivo en cada sector se obtiene de una encuesta agrícola.

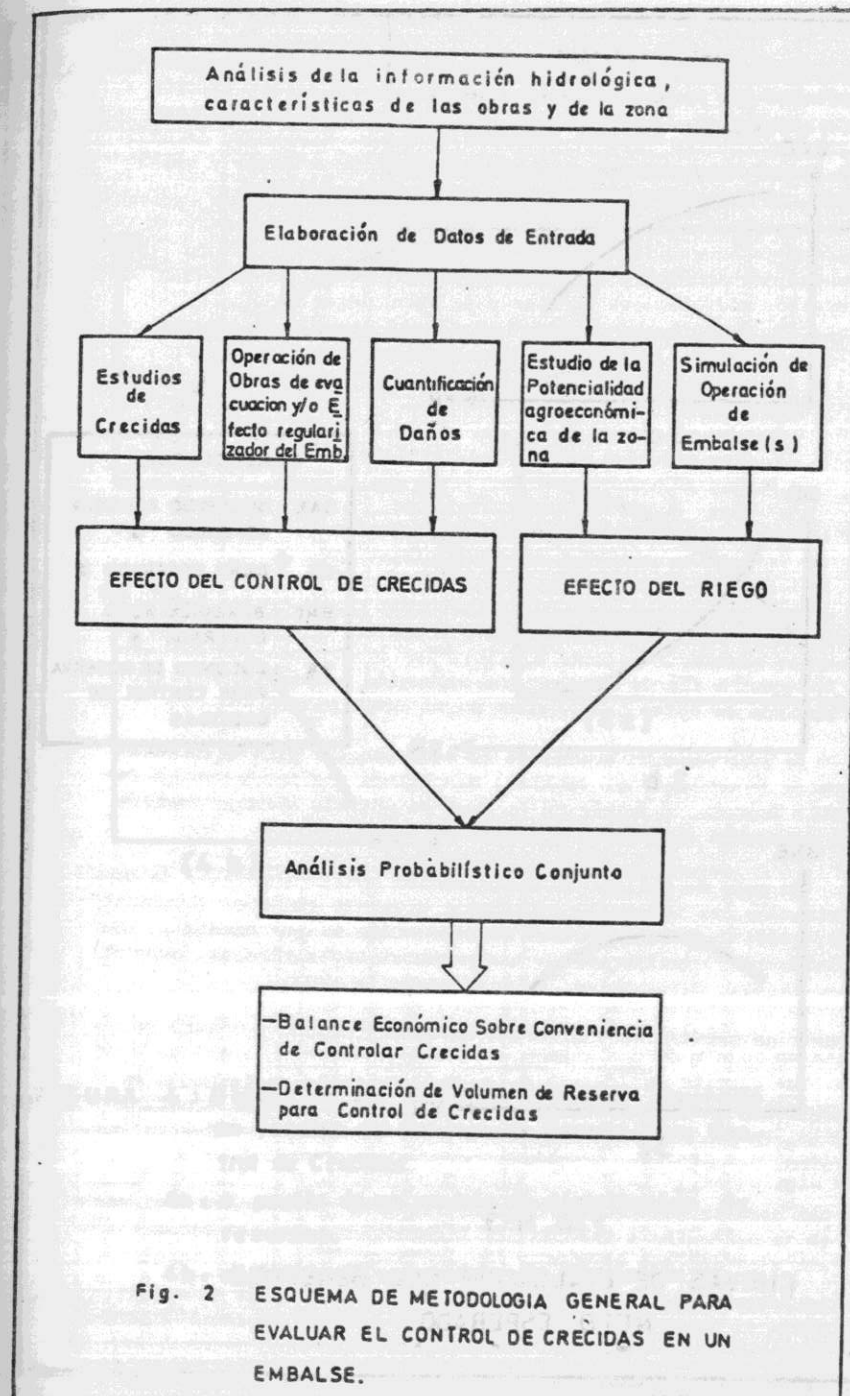
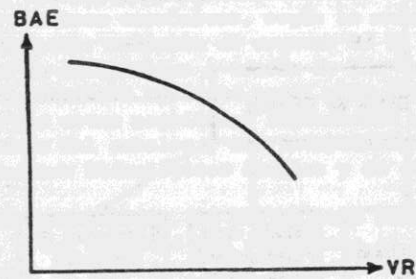
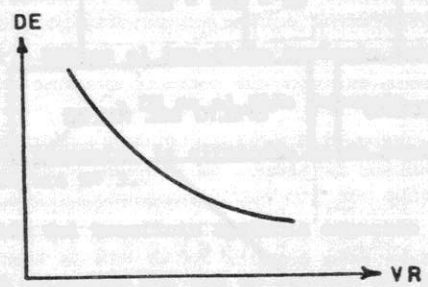


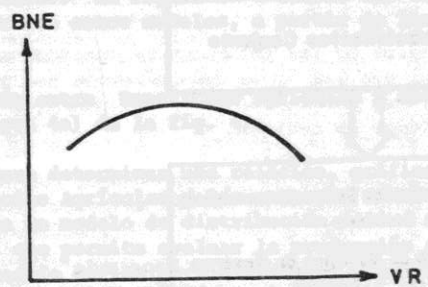
Fig. 2 ESQUEMA DE METODOLOGIA GENERAL PARA EVALUAR EL CONTROL DE CRECIDAS EN UN EMBALSE.



3 a



3 b



3 c

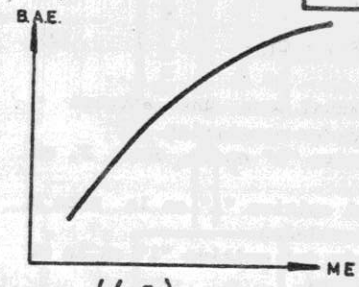
NOMENCLATURA
 BAE : BENEFICIO AGRICOLA ESPERADO \$
 DE : DAÑO ESPERADO \$
 BNE : BENEFICIO NETO ESPERADO \$
 VR : VOLUMEN DE RESERVA PARA CONTROL DE CRECIDAS

FIG. N° 3

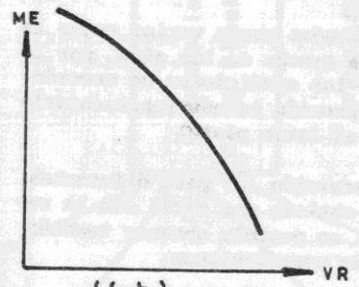
CURVAS DE EVALUACION DEL BENEFICIO NETO ESPERADO

NOMENCLATURA

ME : Meta de Entrega anual del Embalse (m³)
 BAE : Beneficio Agrícola Esperado (\$)
 VR : Volumen de Reserva para Control de Crecidas (m³)

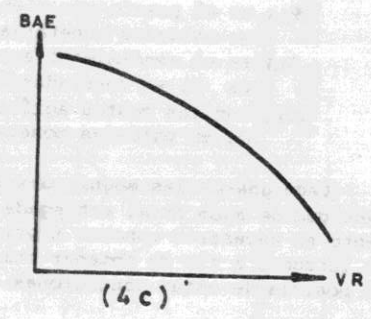


(4 a)



(4 b)

+ =



(4 c)

FIGURA 4 : Obtencion del Beneficio Agrícola Esperado en funcion del Volumen de Reserva para Control de Crecidas

4a : a partir de un modelo de distribución de recursos.

4b : a partir de un modelo de simulación

b) Situación óptima o futura, en que la distribución del agua y de cultivos se determinan de modo de maximizar una función - de beneficios. En este caso, es posible utilizar técnicas - de programación lineal, dinámica, u otras. Luego de definir la forma de representar la distribución de recursos y cultivos, se determina el beneficio agrícola anual como:

$$B_k = \sum_i \sum_j S_{ij} (P_{ij} R_{ij} - C_{ij}) \quad (2)$$

En que: B_k es el beneficio agrícola anual para una entrega - "k" desde el embalse, en unidades monetarias.

S_{ij} es la superficie del cultivo "i" en la zona J, en hectáreas.

P_{ij} es el precio que tiene el cultivo "i" en la zona J, en unidades monetarias/toneladas.

R_{ij} es el rendimiento agrícola del cultivo "i" en la zona J, en toneladas/hectárea.

C_{ij} son los costos agrícolas del cultivo "i" en la zona J, en unidades monetarias/hectárea.

Cada una de las magnitudes indicadas puede variar según la cantidad de agua anual entregada y a través de los años, por lo tanto es necesario conocer a priori las condiciones de mercado de la zona, a fin de obtener una expresión lo más representativa posible de estas condiciones en el largo plazo.

De esta manera, evaluando la ecuación (2) para diferentes niveles de entrega del embalse, se obtiene una curva con la relación buscada, a partir de la cual es posible obtener también una expresión analítica, a través de correlaciones.

En caso de estimar la distribución mediante modelos de optimización, es necesario considerar diversos aspectos restrictivos, tales como la capacidad de conducción de los canales, sus eficiencias, equilibrios en las producciones agrícolas, superficies máximas cultivables, y otras según la zona.

4.2.2. Modelo de Simulación (curva 4b) de la fig. 4).

El proceso de simulación se puede resumir mediante un esquema como el indicado en la figura N° 5, en la que se define - un cierto proceso de evaluaciones, que considera 2 tipos de entradas:

- Las características económicas, físicas, condiciones lógicas de la operación e información hidrológica, que no varían de una simulación a otra.
- La regla de operación de las obras, que considera principalmente el nivel de entrega anual y el volumen de reserva para crecidas en el embalse.

En la figura 6 se muestra un diagrama de bloques correspondiente

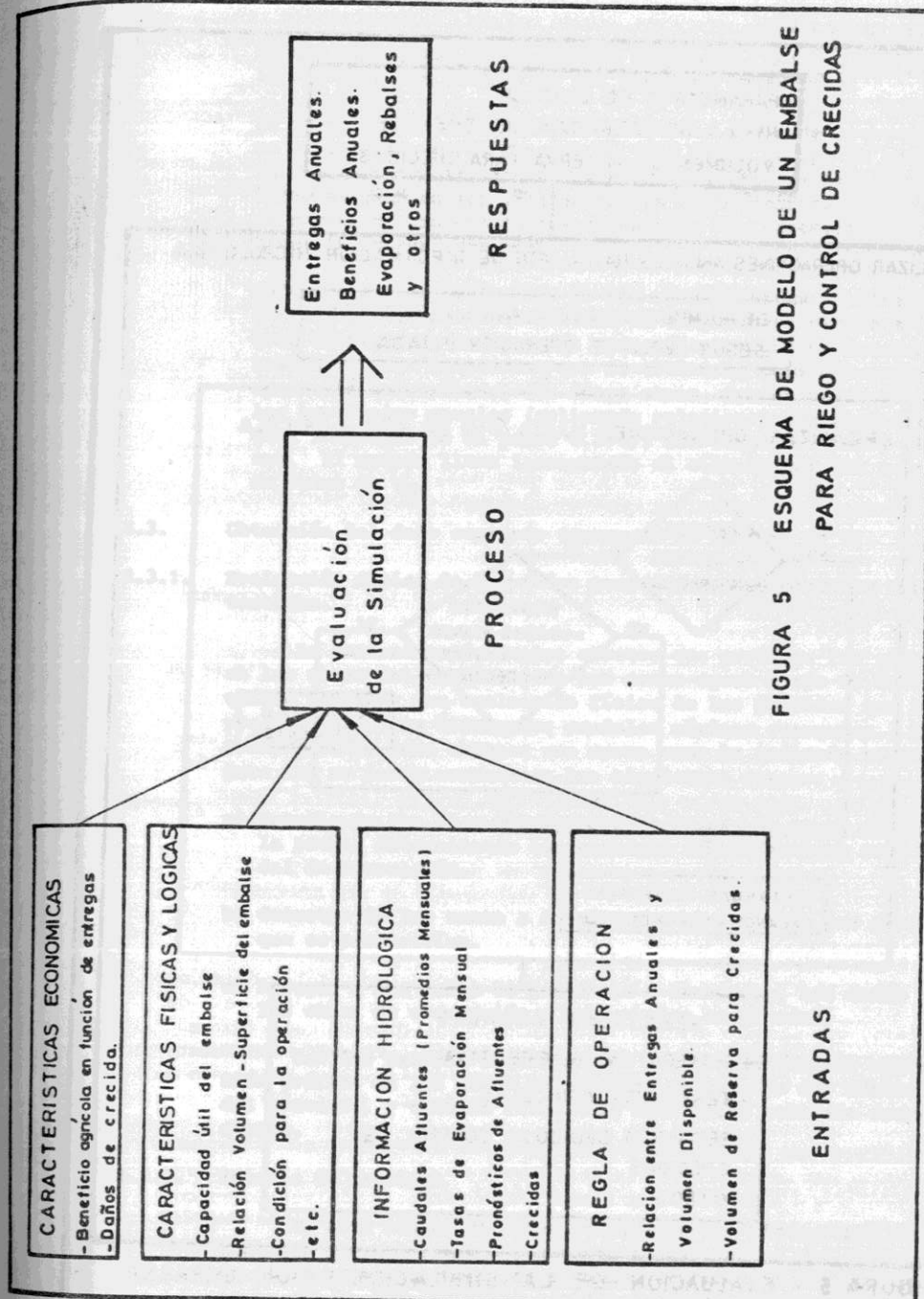


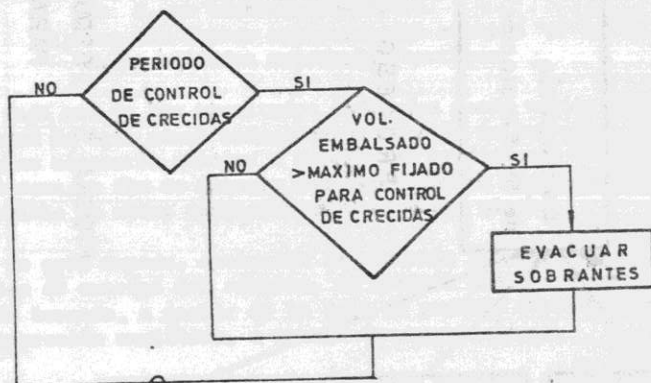
FIGURA 5 ESQUEMA DE MODELO DE UN EMBALSE PARA RIEGO Y CONTROL DE CRECIDAS

PARAMETROS DE ENTRADA
 REGLA DE OPERACION DEL EMBALSE
 VOLUMEN DE RESERVA PARA CRECIDAS

REALIZAR OPERACIONES ANUALES HASTA FIN DE INFORMACION HIDROLOGICA

DETERMINAR ENTREGA ANUAL A REALIZAR
 SEGUN REGLA DE OPERACION FIJADA.

REALIZAR OPERACIONES HASTA FIN DE AÑO AGRICOLA



ENTREGAS MENSUALES
 BALANCE VOLUMETRICO

RESULTADOS ANUALES
 -ENTREGA ANUAL EFECTIVA
 -BENEFICIOS AGRICOLAS
 -REBALSES DEBIDO AL CONTROL DE CRECIDAS
 -OTROS

FIGURA 6 EVALUACION DE LA SIMULACION DE UN EMBALSE PARA RIEGO Y CONTROL DE CRECIDAS.

diente al proceso de evaluación propuesto, una vez que se han incorporado los parámetros del problema específico.

De acuerdo a esta figura, se define una regla de operación, como la indicada en el numeral 3, y un valor de V_R ; se efectúa la simulación mensual durante todos los años de estadística, luego se cambian los valores de los parámetros de entrada, y se repite el proceso tantas veces como sea necesario para obtener la curva deseada.

Este proceso de evaluación de las operaciones mensuales, se realiza generalmente utilizando un computador, debido a la gran cantidad de información y de cálculos que es necesario realizar. Las respuestas que se obtienen, para una regla de operación determinada, son entre otras, las entregas anuales, los beneficios anuales (aplicando relaciones Beneficios-Entregas, indicadas en el punto 4.2.1), las evaporaciones y rebalces. El modelo lleva incorporado el cálculo del BAE para cada valor de V_R .

4.3. Obtención del daño esperado (curva 3b de la fig. N° 3).

4.3.1. Evaluación física de los daños para diferentes caudales máximos vertidos.

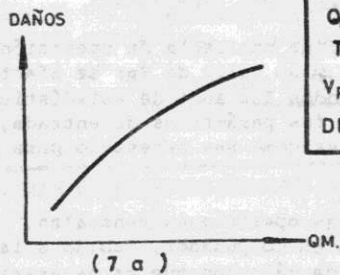
La determinación de los efectos que producen las crecidas en las obras del embalse y en las zonas aguas abajo de éste, requiere realizar una evaluación física de las pérdidas que se producirían, para diferentes caudales máximos evacuados. El procedimiento para obtener una curva como la indicada en la figura 7a) se puede resumir en las siguientes etapas:

- Estudio de los ejes hidráulicos de las zonas aguas abajo de la presa, determinando los sectores inundados para cada caudal de evacuación.
- Catastro de las zonas a inundar y evaluación de las pérdidas que se producirían.
- Agregar a los daños de las zonas a inundarse, los daños en las obras de evacuación y del embalse en general.

Con los valores obtenidos, es posible determinar una relación gráfica de los daños de crecidas en función del máximo caudal evacuado, y también relaciones analíticas mediante correlaciones.

4.3.2. Estudio de crecidas

En esta etapa, se deben considerar los hidrogramas de las crecidas que representen los potenciales eventos que ocurrirán en el largo plazo, como por ejemplo, crecidas de período de retorno (T) de 100, 200, 500 y 1000 años. Para cada crecida considerada, se puede evaluar la operación del embalse durante és-



NOTACION
 Q_M : Máximo Caudal Evacuado (m^3/s)
 T : Periodo de Retorno (años)
 V_R : Volumen de Reserva para Crecidas en m^3
 DE : Daños Esperados (#)

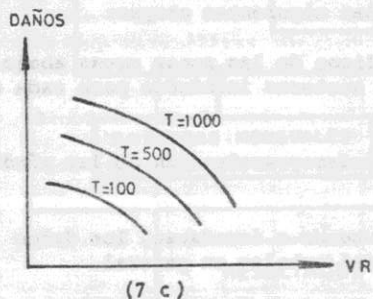
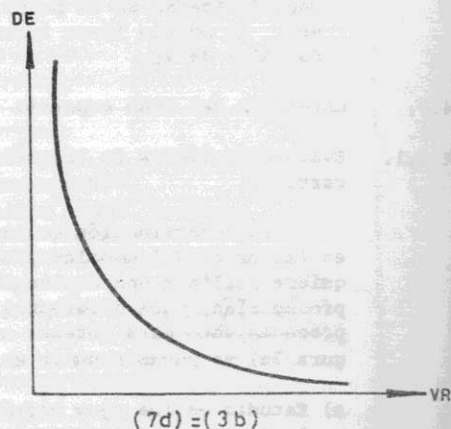
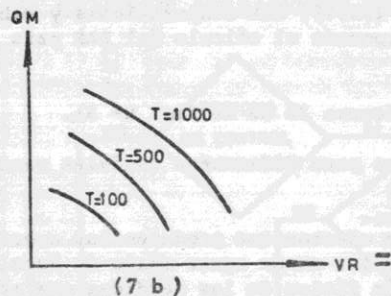


FIGURA 7 : DETERMINACION DEL DAÑO ESPERADO

(7a): Resultado de Catastro de Zonas de Inundación por crecidas
 (7b): Efecto amortiguador del Embalse para diferentes crecidas
 (7c): Efecto del volumen de reserva de los daños provocados por crecidas

ta, y determinar el máximo caudal evacuado. Este caudal dependerá principalmente del volumen inicial del embalse (volumen de reserva para control de crecidas) y de la forma de operar las obras de evacuación. De esta manera, realizando operaciones simuladas del embalse durante cada crecida, considerando diferentes condiciones iniciales, se obtienen curvas del caudal máximo vertido, en función del volumen de reserva, como se indica en la figura 7b.

Aplicando las relaciones entre los daños de crecidas y el máximo caudal evacuado, es posible obtener curvas de los daños de crecidas en función del volumen de reserva en el embalse, para diferentes períodos de retorno, tal como se indica en la figura 7c.

4.3.3. Determinación del daño esperado.

De las etapas anteriores se obtiene un conjunto de valores del daño de crecidas y su correspondiente probabilidad de excedencia ($1/T$), para cada valor de V_R , con lo cual es posible determinar el daño esperado matemático, que se define como:

$$\text{Daño Esperado} = \int_{-\infty}^{+\infty} X f(X) dx \quad (3)$$

en que: (X) es una función de distribución de la variable aleatoria $X = \ln$ (daños)

Se considera adecuado utilizar en principio una función de distribución Logaritmo-Normal, por adaptarse con facilidad a las características del problema en la mayoría de los casos. De todas maneras, en una aplicación, debe verificarse que exista una buena correlación de los datos, para esta distribución.

El valor esperado de los daños, en esta distribución se determina con la expresión:

$$D.E. = e^{\mu - \frac{\sigma^2}{m}} \quad (4)$$

en que: μ y σ son los parámetros de la distribución Logaritmo-Normal, promedio y desviación standard respectivamente, de la variable $X = \ln$ (daños).

C y m son coeficientes de corrección del parámetro, de la distribución, obtenidos de una correlación lineal entre las variables t y t^2 , en que

$$t = \frac{X - \mu}{\sigma}, \text{ variable tipificada correspondiente a una cierta probabilidad de excedencia de}$$

los valores de X.

t^* , valor matemático de la distribución Logaritmo-Normal, asociado a una cierta probabilidad de excedencia de los valores de X, de modo que se verifique:

$$t^* = mt + C$$

Se aplica entonces la ecuación (4) para diferentes volúmenes de reserva de crecidas del embalse, obteniéndose finalmente la curva deseada (3b ó 7d).

4.4. Determinación del óptimo.

El volumen de reserva óptimo para control de crecidas, se determina considerando el mayor valor del Beneficio Neto Esperado, magnitud que se calcula como la diferencia entre los Beneficios Agrícolas Esperados y Daños Esperados (fig. 3c).

5. Conclusiones

La metodología desarrollada permite la evaluación de la operación de un embalse para fines de riego y control de crecidas y determinar la conveniencia de dichos usos.

La evaluación de una cierta regla de operación de las obras, utilizando el Beneficio Neto Esperado, permite conocer un promedio de las respuestas económicas del embalse en el largo plazo, constituyendo un parámetro para tomar decisiones.

La metodología planteada es bastante simple y efectiva a la vez, debido a que utiliza técnicas de modelación bastante conocidas, que son lo suficientemente flexibles como para adaptarse a las diferentes situaciones que se pueden presentar en cada caso.

La aplicación de la metodología es un proceso largo y delicado, que requiere de una serie de análisis específicos, tales como el estudio de las crecidas, eje hidráulico en el río aguas abajo de la presa, daños que produce cada inundación, determinación de los factores agroeconómicos y otros.

La calidad de los resultados que pueden obtenerse con la metodología propuesta, depende en gran medida de la calidad de la información agroeconómica correspondiente a la zona en estudio.

BIBLIOGRAFIA :

- 1) Barros, Oscar. Investigación Operativa, VOL I.
- 2) D.F.L. N° 162 de 1969. Código de Aguas, Libro II, Título VI.
- 3) Espíldora Basilio, Arrau Luis, Modelo de Decisiones para la Asignación Regional del Agua de Riego en una Cuenca, Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, 1977.
- 4) Espíldora Basilio, Brown Ernesto, Cabrera Guillermo e Isensee Pablo. Elementos de Hidrología. Centro de Recursos Hidráulicos, Universidad de Chile, 1975.
- 5) Kaliski, Enrique. Operación del Sistema Paloma Considerando Control de Crecidas. Memoria de Título. Universidad de Chile, 1981.