

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
V CONGRESO NACIONAL

EVALUACION DEL USO ADICIONAL DE UN EMBALSE DE RIEGO
PARA CONTROL DE CRECIDAS
II APLICACION AL SISTEMA PALOMA

Luis Arrau del Canto (1)

Enrique Kaliski Kriguer (2)

RESUMEN

Se presenta una aplicación al Sistema Paloma de la metodología desarrollada en la Dirección de Riego para evaluar el uso adicional de un embalse de riego para control de crecidas. Esta evaluación se realiza sobre la base de calcular, para diferentes volúmenes de reserva para crecidas en el embalse Paloma, el Beneficio Neto Esperado, definido como el Beneficio Agrícola Esperado menos el Daño Esperado. Esta magnitud permite determinar la respuesta económica probable del sistema en el largo plazo e independizarse de la fuerte aleatoriedad de las variables hidrológicas de la zona y de condiciones especiales de operación de las obras.

La obtención del Beneficio Agrícola Esperado se realizó a través de la confección de un modelo de simulación que permite obtener las entregas anuales del Sistema Paloma para diferentes reglas de operación y volúmenes de reserva para controlar crecidas en el embalse Paloma. El Beneficio Agrícola asociado a estas entregas se determina con un modelo de distribución de los recursos de agua desde los embalses a cada zona de riego, considerando dos situaciones: actual a base de una encuesta agrícola, y óptima a base de técnicas de programación lineal.

El Daño Esperado asociado a los diferentes caudales en el río se obtiene ajustando una función de distribución logaritmo-normal, a una serie de valores estimados a base de: estudios de crecidas afluentes, zonas inundadas según eje hidráulico en el río Limarí, efecto amortiguador del embalse y catastro de daños.

-
- (1) Ingeniero Civil. Jefe de Proyectos Sist. Paloma, Direc. Riego
(2) Ingeniero Civil. Departamento de Estudios, Dirección de Riego

1. INTRODUCCION

El embalse Paloma, ubicado aguas arriba de la ciudad de Ovalle en la IV Región del país, fue diseñado y construido con el objeto de mejorar el regadío en el valle del río Limarí. Este embalse tiene una capacidad útil de 750 millones de metros cúbicos y forma parte de un conjunto de obras de riego interconectadas, llamado Sistema Paloma, constituido principalmente además por los embalses Recoleta y Cogotí.

Los recursos hídricos de la Hoya Hidrográfica del río Limarí tienen gran variación anual y estacional, razón por la cual se hace necesaria la regulación de los caudales afluentes para aprovechar adecuadamente el uso de los recursos. Esta aleatoriedad de los caudales afluentes significa además, el constante riesgo de ocurrencia de grandes crecidas que pueden ocasionar graves daños si no se controlan adecuadamente, debido a la existencia en el lecho del río de obras importantes incluyendo parte de la ciudad de Ovalle.

Las consideraciones anteriores y los resultados de una revisión de las características de las crecidas afluentes y de las inundaciones que éstas provocarían, realizada por la Dirección de Riego, han indicado la necesidad de realizar un estudio que cuantifique la conveniencia de destinar el embalse Paloma además, para el control de crecidas.

El propósito de este trabajo es determinar si la operación del Sistema Paloma permite obtener mayores beneficios globales de las obras al considerar un volumen de reserva en el embalse Paloma, para el mencionado uso.

La evaluación del uso adicional del embalse Paloma para el control de crecidas, se realiza basándose en la metodología general desarrollada por los autores de este trabajo. Esta aplicación de dicha metodología fue realizada considerando las situaciones agroeconómicas en el mes de Marzo de 1980.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PALOMA, E INFORMACIÓN BÁSICA

El Sistema Paloma está formado básicamente por los embalses Recoleta, Paloma y Cogotí, los cuales en conjunto poseen una capacidad útil de 1000 millones de m³. En la fig. N° 1 se observa la interconexión existente entre estas obras, así como la red de los principales canales de distribución.

Estos canales conducen los recursos de agua desde ríos y embalses a las zonas de producción agrícolas, y suman una longitud total de 590 km de recorrido, de los cuales dos tercios tienen capacidades entre 3 y 8 m³/s. La Hoya del río Limarí tiene un total de 68068 hectáreas potenciales de riego, de las cuales, 39096 están bajo los embalses. A continuación se describe un resumen de la informa-

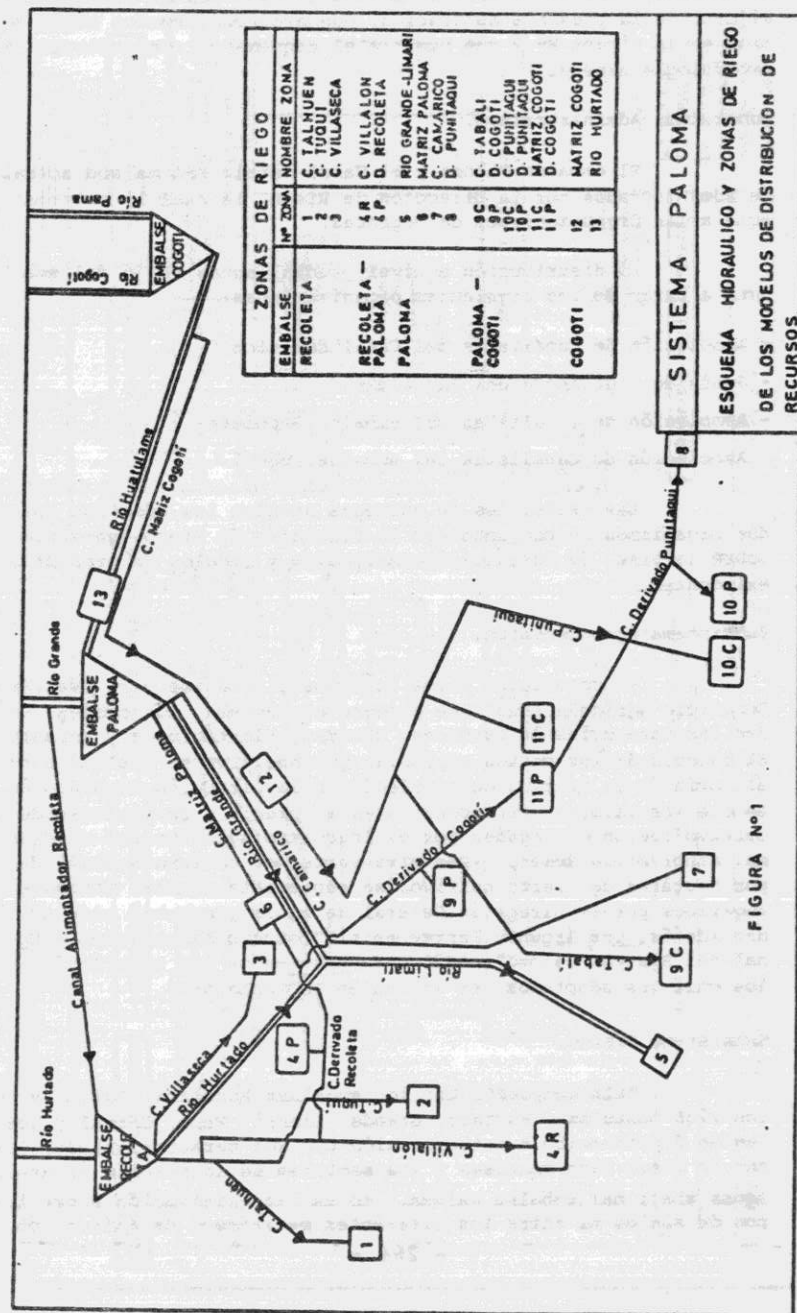


FIGURA N° 1

ción más relevante relacionada con la aplicación de la metodología, de acuerdo a los cinco subsistemas definidos. Estos subsistemas, en el caso de la presente aplicación, quedaron conformados según se indica en la figura N° 2 que muestra el esquema correspondiente a la metodología general.

2.1. Subsistema Administrativo.

El embalse Paloma y el Canal Matriz Paloma son actualmente administrados por la Dirección de Riego, la cual le entrega el agua a las Organizaciones de Regantes.

La distribución a nivel predial aguas abajo del embalse, está a cargo de las siguientes organizaciones:

- Asociación de Canalistas del Canal Camarico
- Junta de Vigilancia del Río Limarí
- Asociación de Canalistas del embalse Recoleta
- Asociación de Canalistas del embalse Cogotí

Las decisiones de entregas anuales las efectúan los citados organismos en conjunto con la Dirección de Riego, generalmente sobre la base de estudios operacionales y modelos de pronósticos existentes.

2.2. Subsistema Agroeconómico.

Se consideran nueve cultivos diferentes para evaluar el Beneficio Agrícola Anual que produce el sistema, los cuales comprenden las categorías de cereales, chacras, plantaciones y empastadas. El cálculo de los costos agrícolas por hectárea se realizó con la asesoría de la Oficina de Agrología de la Dirección de Riego en tanto que los valores correspondientes al precio y rendimiento de cada cultivo fueron entregados por el Ingeniero Agrónomo del embalse Paloma, señor Jorge Romero. Por otra parte, el consumo mensual de agua por hectárea de cierto cultivo, se representa con las Tasas de Riego sugeridas por la Dirección General de Aguas y que han sido utilizadas además, por Brown y Ferrer en el "Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Paloma", 1976. Un resumen de las características de los cultivos adoptados, se indica en la tabla N° 1.

2.3. Subsistema Físico.

Está compuesto por los embalses Recoleta, Paloma y Cogotí; los ríos Huatulame, Hurtado, Grande, Limarí, Pama y los canales de distribución e interconexión con sus características; las zonas de riego bajo embalses y los sectores de inundación de crecidas aguas abajo del embalse Paloma. No se hizo distinción entre los tipos de suelos ni entre los diferentes mecanismos de aplicación del

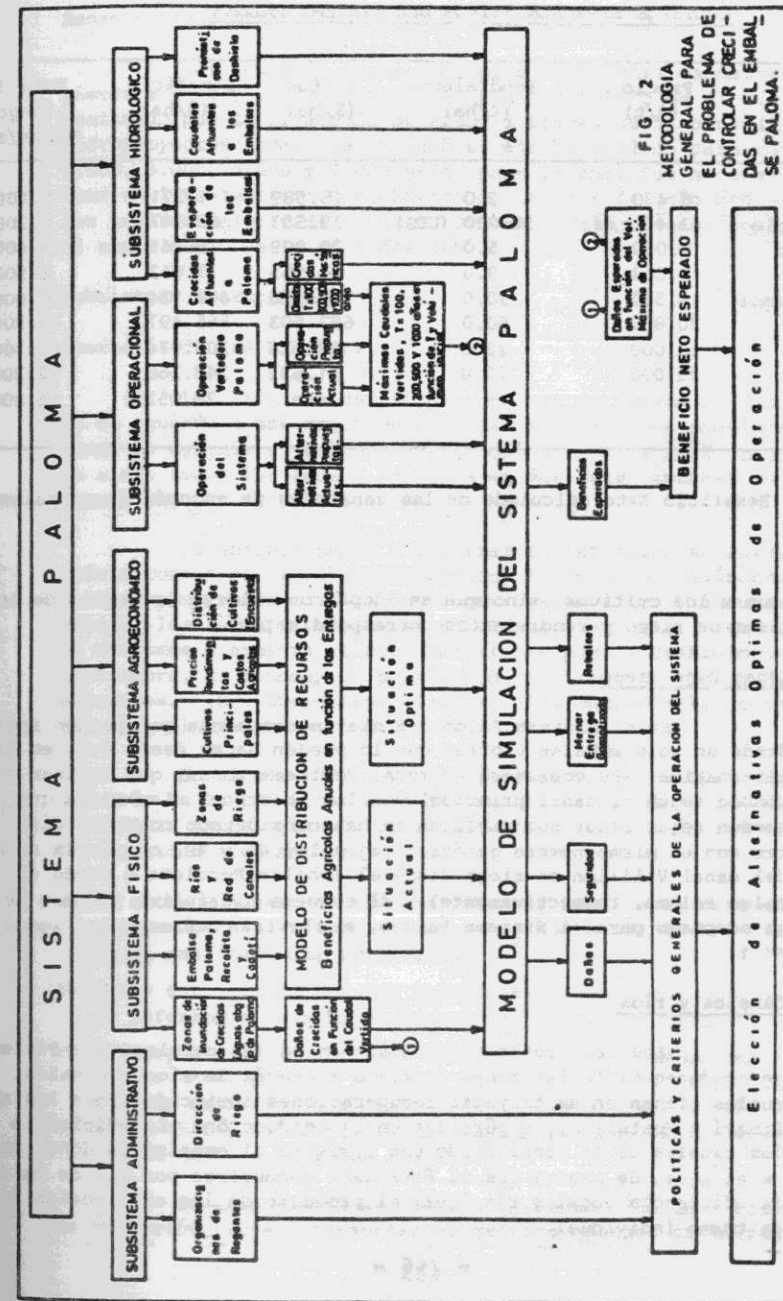


FIG. 2
METODOLOGIA
GENERAL PARA
EL PROBLEMA DE
CONTROLAR CRECI-
DAS EN EL EMBAL-
SE PALOMA.

T A B L A N° 1

CULTIVOS REPRESENTATIVOS DEL SISTEMA PALOMA

Cultivo	Precio (\$/t)	Rendimiento (t/ha)	Costos (\$/ha)	Beneficio (\$/ha)	Tasa de Riego m ³ /ha/año
Trigo	8.430	2,0	15.589	1.271	6.600
Maíz, choclo	3.43 c/u	30.000 (UDS)	39.553	63.347	6.200
Maíz Grano	9.030	5,0	39.909	5.241	9.400
Papas	9.063	9,0	73.955	7.612	8.500
Tomate Primor	19.500	30,0	110.866	474.134	10.000
Tomate	20.800	60,0	682.503	565.497	12.200
Viñas	18.000	22,0	93.026	302.974	11.700
Paltos	20.000	20,0	51.632	348.368	12.200
Alfalfa	-	-	-	28.052(1)	16.800

(1) Beneficio Neto calculado de las ganancias de engorda de animales.

agua a los cultivos, sino que se adoptaron valores promedios de las tasas de riego y rendimientos correspondientes.

2.3.1. Zonas bajo riego

En el Sistema Paloma se distinguen zonas que pueden regarse desde un solo embalse y otras que lo pueden hacer desde dos, en forma alternativa. Se consideró un total de trece zonas, que reciben su nombre según el canal principal que las abastece. Las zonas que se pueden regar desde dos embalses se han considerado como dos diferentes con el mismo nombre genérico (ejemplo, 4R y 4P, cuando la zona del canal Villalón se riega desde el embalse Recoleta o desde el embalse Paloma, respectivamente). El esquema hidráulico y zonas de riego adoptado para el Sistema Paloma, se ilustran mediante la figura N° 1.

2.3.2. Canales y ríos

Los recursos que se almacenan en los embalses del Sistema, se conducen hasta las zonas de riego a través de ríos o canales, los cuales tienen en su trayecto recuperaciones (principalmente los ríos Limarí y Huatulame), o pérdidas en la conducción. La eficiencia de los canales se ha considerado con respecto al embalse de donde proviene el agua, de manera que si ésta debe conducirse por más de un canal, la eficiencia total sería igual al producto de las eficiencias de cada tramo individual.

2.3.3. Zonas de Inundación.

Las zonas de inundación para diferentes caudales se obtuvieron a partir de un estudio del eje hidráulico en el río Limarí, realizado por la Dirección de Riego a través de la consultoría de Hidroproyectos Ltda. Se calculó el eje hidráulico para caudales de 1.000, 3.000, 5.000 y 7.000 m³/s, para lo cual fue necesario efectuar un levantamiento topográfico de la zona del río mediante perfiles transversales cada 1.000 m, distancia más o menos equivalente al ancho medio de la caja del río.

2.4. Subsistema Operacional.

2.4.1. Operación de los Embalses.

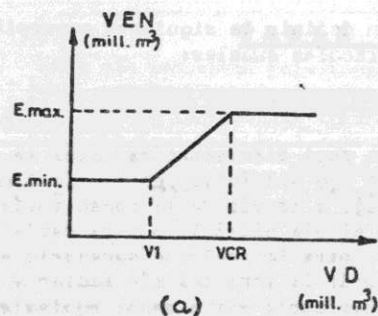
Los embalses del Sistema Paloma se operan en forma conjunta de acuerdo a una regla de entregas anuales, que consiste básicamente en definir el volumen máximo que se distribuirá a las zonas de riego todos los años y la forma en que esta cantidad se reduce cuando hay escasez de recursos.

La entrega anual a realizar se determina en forma aproximada a comienzos del año hidrológico, 1° de Mayo, basándose en el volumen almacenado en esta fecha por los embalses y en una estimación de los caudales afluentes en el resto del año. Esta cantidad se mantiene o aumenta al comenzar el período de deshielos, 1° de Septiembre, al conocer un pronóstico confiable de los caudales afluentes. (BF. Ingenieros Civiles 1978. Metodología de Pronósticos para el Sistema Paloma).

En el año 1978, la Dirección de Riego realizó un estudio, a través de la consultoría de BF Ingenieros Civiles, con el objeto de definir estrategias de operación sobre la base de los criterios de seguridad siguientes:

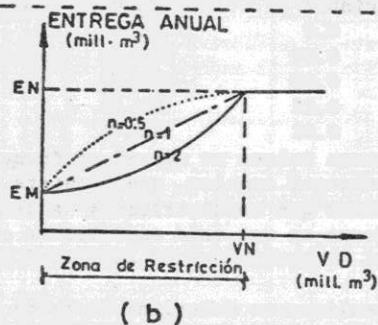
- La entrega anual del Sistema debe ser igual a la meta máxima, o a lo menos a un 90% de ellas, en el 85% o más de los años en que se ha realizado una simulación.
- Estas entregas pueden ser inferiores a las metas máximas, pero no inferior a la meta mínima, en un 14% de los años.
- Se acepta que las entregas sean inferiores a la mínima en el 1% de los años, pero no inferior al 25% de la meta máxima. Esta situación corresponde al último año de la extrema sequía ocurrida entre 1968 y 1971, que según consideraciones hidrológicas, ocurriría una vez cada 100 años.

De esta manera se llegó a la definición de 7 estrategias de operación, cuya representación gráfica aparece en la figura 3a.



NOMENCLATURA

E MAX: Meta Máxima de Entrega Anual
 VEN : Volumen Entregas
 E MIN: Meta Mínima de Entrega Anual
 VCR : Volumen Crítico (a partir del cual se entrega E.MAX)
 VD : Volumen Disponible
 SI $VD \leq V1$, $VEN = E MIN$

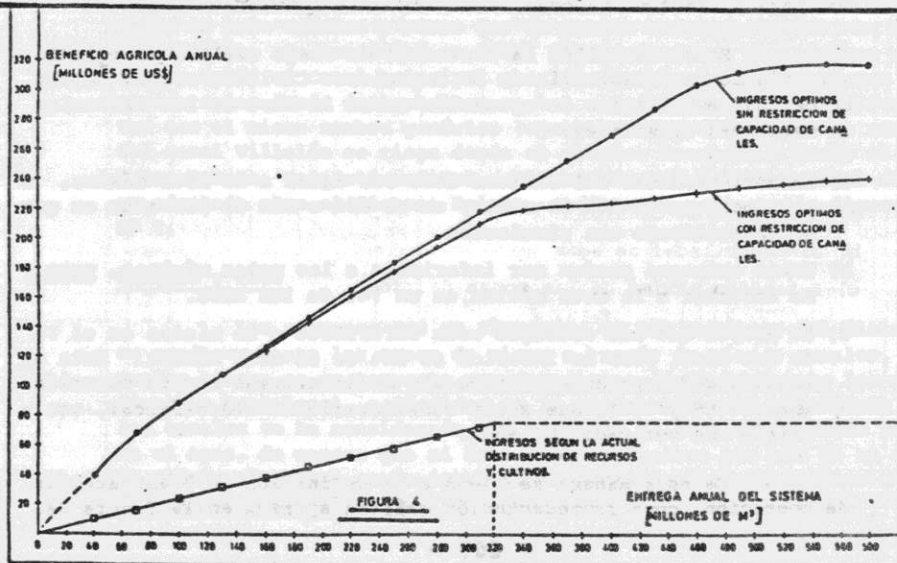


NOMENCLATURA

EN : Entrega Normal
 EM : Entrega Mínima
 VN : Volumen Normal
 VD : Volumen Disponible
 n : Parámetro de la Simulación

FIG. 3.-REGLAS DE OPERACION DEL SISTEMA PALOMA

- a) Entregas Actuales
 b) Regla de operación propuesta



En la actualidad, los usuarios de los canales determinan la cantidad de agua correspondiente a cada sector, utilizando un sólo valor promedio de la eficiencia de los canales que asocian.

Tal como lo indica la fig. N°1, la aplicación de la metodología contempla 2 situaciones: una actual y una óptima, o futura. Para evaluar la situación actual de distribución del agua se utilizaron los valores promedios de las Asociaciones de Canalistas y Juntas de Vigilancia, y para evaluar una situación óptima o futura, se emplearon los valores exactos de cada canal. Esta información se resume en la tabla 2.

T A B L A N° 2

CAPACIDAD Y EFICIENCIA DE CANALES (1)

Nº Zona	Nombre Zona	Capacidad m3/s	Eficiencia (2) %	Eficiencia (3) %
1	C. Talhuén	1.0	73.0	60.0
2	C. Tuquí	0.6	75.0	60.0
3	C. Villaseca	0.5	80.0	60.0
4R	C. Villalón	4.0	61.5	60.0
4P	D. Recoleta	3.65	55.2	60.0
5	Río Limarí	-	140.0	140.0
6	Matriz Paloma	8.0	93.0	93.0
7	C. Camarico	3.5	75.0	70.0
8	D. Punitaqui	1.9	81.3	65.0
9C	C. Tabalí	4.0	49.1	60.0
9P	D. Cogotí	4.35	85.6	60.0
10C	C. Punitaqui	1.2	34.3	65.0
10P	D. Punitaqui	1.9	81.3	60.0
11C	Matriz Cogotí	8.0	53.4	60.0
11P	D. Cogotí	4.35	85.6	60.0
12	Matriz Cogotí	8.0	53.4	60.0
13	Río Huatulame	-	115.0	115.0

(1) Fuente: Asociación de Canalistas Embalse Recoleta

Brown y Ferrer, 1976, Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Paloma.

(2) Eficiencia con respecto al embalse.

(3) Eficiencia utilizada por la Asociación de Canalistas correspondiente.

Para efectos del modelo de simulación, se proponen reglas de operación, tales como las indicadas en la figura 3b, considerando distintas capacidades de regulación del embalse Paloma, durante los meses de Invierno (Mayo a Agosto, ambos inclusive). Estas reglas de operación presentan las siguientes características fundamentales:

- a) Todos los años debe entregarse una cantidad mayor o igual a un mínimo que se considera como esencial para mantener las plantaciones permanentes (30% de su consumo normal) y una parte de los cultivos anuales más importantes (5%). Considerando la Encuesta Agrícola de Paloma 1976-77, las tasas de riego y eficiencias de conducción de canales, se determinó un valor de 44,4 millones de metros cúbicos, para este mínimo.
- b) La entrega máxima se debe efectuar en el 85% o más de los años simulados. En el resto de los años, se acepta que éstas estén entre el mínimo y el máximo, definiéndose esta cantidad por una relación que depende del volumen disponible en el sistema.
- c) Se considera como parámetro de la regla de operación, el volumen de reserva para crecidas en el embalse Paloma.

2.4.2. Operación del Vertedero del Embalse Paloma.

La forma de evacuar una crecida regulando las compuertas del vertedero del embalse Paloma, tiene gran importancia en los daños que se producirán aguas abajo de la presa y en la seguridad de las obras. La operación actual de las compuertas del vertedero consiste básicamente en una abertura brusca de ellas (6 m para una variación de nivel de 60cm), lo cual significa que la curva de descarga corresponde a una ley de operación bastante exigente, que prácticamente no ayuda al control de crecidas.

Si el embalse Paloma tiene un volumen de reserva para crecidas, durante los meses de invierno, Mayo-Agosto, es posible entonces disminuir el máximo caudal evacuado, sobre todo si se cuenta además con un pronóstico a corto plazo de las características de la crecida.

Se propone una regla de operación a futuro, que consiste en ir evacuando la crecida en la misma cantidad de los afluentes, hasta llegar a un valor máximo determinado, el cual se mantiene constante subiendo el nivel del embalse y operando adecuadamente las compuertas. De esta manera, la parte de la crecida entre el máximo caudal evacuado y el peak de ésta, es almacenado completamente en el volumen de reserva del embalse. Al finalizar este evento, el embalse queda en las mismas condiciones iniciales.

Esta regla se debe ir implementando en la medida que se vayan perfeccionando los modelos de pronósticos a corto plazo. En caso contrario, se corre un grave riesgo de tener que evacuar en un determinado momento un caudal mayor que el peak de la crecida.

2.5. Subsistema Hidrológico.

La información relevante para este subsistema se ha extraído de los estudios correspondientes que ha realizado la Dirección de Riego a través de la Consultoría de la firma Brown y Ferrer Ingenieros Civiles.

2.5.1. Crecidas afluentes a Paloma

Se estudiaron los hidrogramas de crecidas para diferentes períodos de retorno. Los valores más relevantes acerca del caudal peak y del volumen de la crecida se indican en forma aproximada en la tabla N° 3.

TABLA N° 3

CRECIDAS AFLUENTES A EMBALSE PALOMA

PERIODO DE RETORNO (AÑOS)	Q PEAK (m ³ /s)	V (m ³ X 10 ⁶)
100	2.000	260
200	2.500	330
500	4.100	500
1.000	5.100	620

2.5.2. Tasas de evaporación mensual de los embalses.

Se adoptó una tasa única para los 3 embalses, que tiene un valor mínimo de 26,3 mm en el mes de Junio, un máximo de 164,3 mm en el mes de Enero, y un total anual de 1030,8 mm.

2.5.3. Caudales afluentes a los embalses.

Se utilizó una estadística de 36 años de caudales medios mensuales, afluentes a cada uno de los 3 embalses. El orden de magnitud del caudal medio afluente es de 7.5, 2.3 y 1.6 m³/s para los embalses Paloma, Cogotí y Recoleta respectivamente.

2.5.4. Pronósticos de deshielo.

Existe una metodología de pronósticos que se utilizó en el modelo de simulación, con el objetivo de representar las condiciones actuales de operación anual.

Esta metodología consiste en pronosticar el volumen afluente al Sistema durante el período Septiembre-Abril de cada año, sobre la base de índices definidos a partir de las precipitaciones de los meses anteriores a Septiembre y del año anterior.

3. MODELOS DEL SISTEMA PALOMA

3.1. Supuestos Generales.

Para la evaluación de los Beneficios Agrícolas del Sistema, se han realizado algunas simplificaciones de las numerosas variables que inciden en él, a fin de desarrollar un modelo simple, de acuerdo a la cantidad y calidad de la información disponible. Por lo tanto, la interpretación de los resultados tiene vital importancia, debiendo ser cuidadosamente estudiados, verificando su validez, de acuerdo a los postulados iniciales.

Los supuestos considerados son:

- a) El precio y rendimiento de un determinado cultivo dependen solamente del tipo de cultivo. Para esto, se han considerado valores promedios representativos de cada uno de ellos, extraídos directamente de la información de la zona.
- b) Los costos de producción agrícola de un cultivo son iguales para todos los predios de cada zona, con lo cual el costo agrícola depende sólo del tipo de cultivo y del sector de riego.
- c) Los cultivos del Sistema Paloma quedan bien representados por nueve productos; de esta manera, se supone que los agricultores aprovechan los recursos entregando solamente estos cultivos, los cuales se han escogido considerando principalmente su influencia económica y la gran superficie destinada a ellos.
- d) Para establecer una continuidad en el modelo, se supondrá que al aumentar las entregas, existe siempre un aumento en la producción agrícola, lo que equivale a imponer que los agricultores cuentan con el capital y recursos materiales, asistencia técnica, etc, para sembrar y cosechar la superficie correspondiente al agua que se les otorga. En la práctica, esto no siempre es así, ya que a veces, existiendo el agua necesaria, los agricultores no obtienen el máximo provecho de ésta por falta de recursos económicos u otros, de manera que los resultados son válidos en determinados rangos de soluciones, que podrán ser ampliados en la medida que se verifiquen los requisitos supuestos.
- e) Los Beneficios Agrícolas se considerarán como un beneficio para todo el sistema, independiente de la zona y de eventuales coyunturas, debido a que es un parámetro que representa bastante bien el efecto de una determinada política o regla de operación global.
- f) Se considera el sistema funcionando bajo condiciones climáticas normales, es decir, el análisis no es válido para condiciones de extrema sequía o en años de excesiva humedad, en cuyos casos, el sistema opera según las condiciones particulares de cada situación.
- g) No se han realizado análisis de mercado que permitan estimar influencias de factores externos o variaciones en el tiempo. Se estima que el error que se puede cometer con esta situación, está dentro de los márgenes tolerables desde el punto de vista del objetivo final de evaluación.

Estos supuestos permiten definir la siguiente expresión - para determinar los beneficios agrícolas anuales:

$$B_K = \sum_i \sum_j S_{ij} (P_i R_i - C_{ij}) \quad (1)$$

en que: B_K Es el Beneficio Agrícola Anual del Sistema Paloma, para un cierto nivel de entregas de agua "K".

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

P_i Precio promedio estable del cultivo "i" en \$/T.

R_i Rendimiento agrícola promedio del cultivo "i" en tn/ha

C_{ij} Es el costo de producción agrícola del cultivo "i" con la zona "J" en \$/ha.

3.2. Modelos de Distribución de Recursos.

Para determinar la potencialidad agroeconómica del Sistema Paloma fue necesario estudiar la relación entre el beneficio agrícola y las entregas de agua desde los embalses. Esto se realizó mediante la confección de un modelo de distribución de recursos, sobre base de la ecuación (1), el cual se aplicó para situaciones de distribución actual y óptima.

3.2.1. Situación actual.

Consiste en obtener S_{ij} a partir de la actual distribución de cultivos, lo que se realizó sobre la base de la encuesta agrícola Paloma 1976-77.

Se obtuvo finalmente la expresión: $B_K = 0,2383 V_K$

en que: V_K es el volumen de agua anual entregado por los embalses, en m^3 .

3.2.2. Situación Óptima.

Consiste en optimizar la distribución de recursos; en este caso se utilizaron técnicas de programación lineal, maximizando la expresión (1), sujeto a las siguientes restricciones:

- a) Capacidad de Canales
- b) Disponibilidad de agua
- c) Extensión máxima de las zonas de riego
- d) Rangos de producción de cada cultivo

El problema se resolvió considerando una situación con y sin restricción de capacidad de canales de conducción, y en cada caso, se varió la entrega anual de los embalses desde 40 a 580 millones de m^3 .

Los resultados obtenidos se indican en la figura N° 4 que contiene además los resultados correspondientes a la situación ac -

tual. La diferencia que se observa entre ambas situaciones de distribución, para una determinada entrega, se debe principalmente a una utilización distinta de los canales de conducción y a la elección de los productos agrícolas de mayor rentabilidad.

3.3. Modelo de Simulación.

El objeto de la simulación del Sistema Paloma es representar las operaciones mensuales, correspondientes a 36 años de esta - dística hidrológica, para determinar el efecto que produce la consideración de un volumen de reserva de crecidas en el embalse Paloma. Esta simulación permite básicamente obtener la cantidad de agua entregada anualmente por los embalses, para diferentes reglas de operación, y determinar el Beneficio Agrícola del sistema para cada año del período considerado, aplicando las relaciones entre beneficios y entregas, que se han mencionado anteriormente. La información de entrada de esta simulación y los resultados que entrega se indican en la figura N° 2.

La figura N° 5 muestra un diagrama de flujo global del modelo de simulación utilizado. Una revisión preliminar de las características del sistema enmarcó la búsqueda de la mejor operación, considerando en la simulación los siguientes valores de los parámetros (ver nomenclatura en la fig. N° 3):

Volumen de reserva (mill.m ³):	0,50,100,150,250
EN	: 300,310,320,330
N	: 0,5, 1,0, 2,0
VN	: 350,400,450

4.- BENEFICIO NETO ESPERADO.

El Beneficio Neto Esperado (BNE) se calculó como la diferencia entre el Beneficio Agrícola Esperado (BAE) y el Daño Esperado (DE), es decir:

$$BNE = BAE - DE \quad (2)$$

Los valores que se presentan a continuación en el cálculo del BNE corresponden a una situación actual de cultivos. Sin embargo, los resultados en relación al volumen de reserva recomendado no variaron al aplicar el modelo de distribución óptima de recursos.

4.1. Obtención del BAE.

El BAE se obtuvo directamente a partir de los resultados del modelo de simulación, como el promedio de los beneficios anuales durante el período simulado.

La tabla N° 4 muestra los resultados seleccionados, que cumplen en mejor forma con los criterios básicos deseados. Estos resultados correspondieron a valores de n=2 y VN = 400 (ver fig.3b).

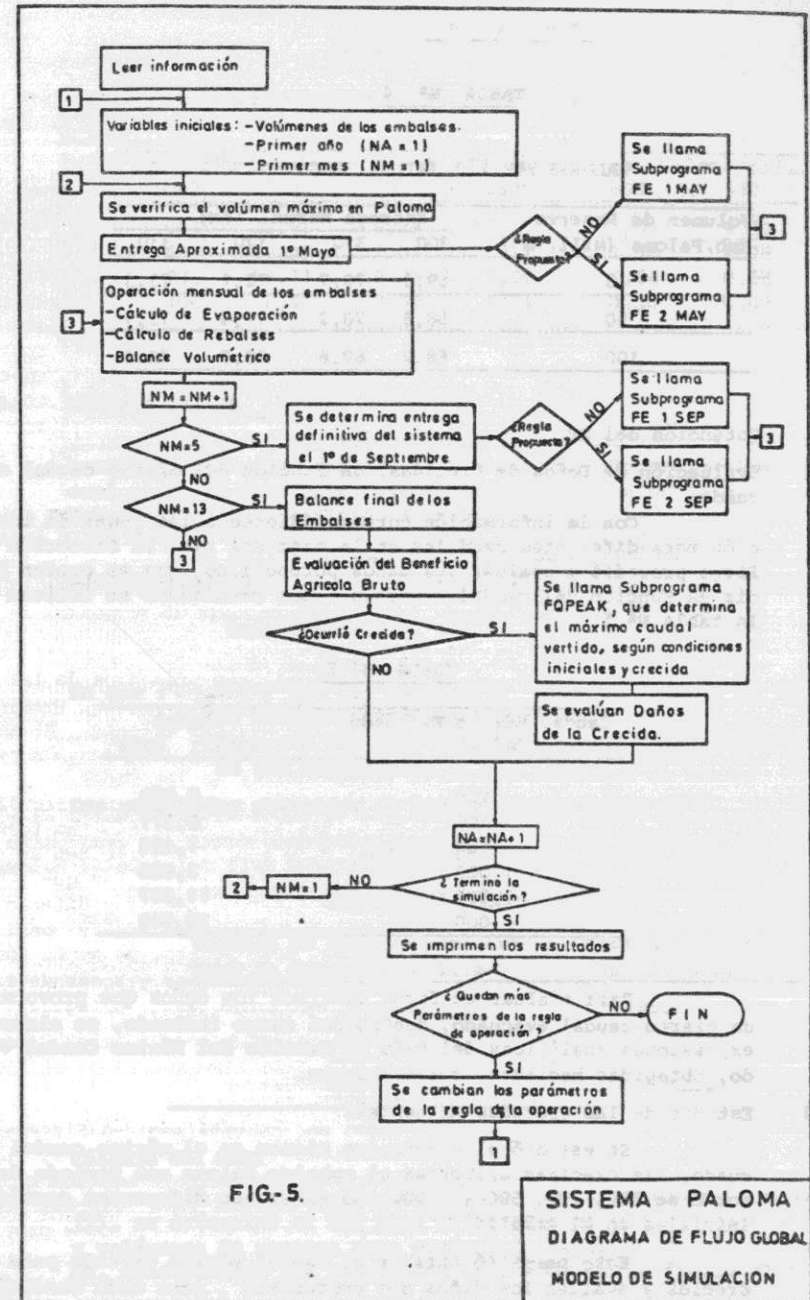


FIG-5.

SISTEMA PALOMA
DIAGRAMA DE FLUJO GLOBAL
MODELO DE SIMULACION

TABLA N° 4

VALORES DEL BAE (MILL. US\$)

Volumen de Reserva Emb. Paloma (mill. m ³)	Entrega Normal (EN)			
	300	310	320	330
0	69,3	70,7	72,1	73,3
50	68,8	70,2	71,4	72,7
100	68,2	69,6	70,9	72,1

4.2. Obtención del DE.

4.2.1. Evaluación de Daños de Crecidas, en función del máximo caudal evacuado.

Con la información correspondiente a las zonas de inundación para diferentes caudales en la caja del río, la Dirección de Riego procedió a evaluar los daños potenciales, que se pueden producir en función del caudal evacuado. Los resultados se indican en la tabla N° 5.

TABLA N° 5

Caudal Máximo Evacuado (m ³ /s)	Daños (mill. US\$)
100	0,000
200	0,311
500	1,434
1.000	3,626
3.000	11,287
6.000	20,000

Para evaluar en forma continua los daños que provocaría un cierto caudal evacuado, dentro del rango indicado, se elaboraron expresiones analíticas del Daño en función del Máximo Caudal Vertido, obtenidas mediante correlaciones.

4.2.2. Estudio de las Crecidas Afluentes.

Se estudió el efecto que tienen en el máximo caudal evacuado, las crecidas afluentes al embalse Paloma con Período de Retorno de 100, 200, 500 y 1.000, considerando diferentes condiciones iniciales en el embalse.

Esto permitió obtener el caudal máximo vertido para cada crecida y evaluar los daños que produciría, para cada condición inicial. Lo anterior se obtuvo aplicando las expresiones analíticas del daño en función del máximo caudal evacuado, deducidas después de agregar los daños estimados en las obras de embalse a los de la tabla N° 5. Los resultados se indican en la tabla N° 6.

TABLA N° 6

DAÑOS DE CRECIDAS (MILL. US\$)

T (años)	Volumen Máximo de Operación en Paloma (mill.m ³)				
	750	700	650	600	550
1.000	23,83	16,39	13,69	11,01	8,83
500	20,03	11,01	10,12	6,56	4,78
200	13,77	5,04	3,06	1,64	0,63
100	10,80	2,92	1,34	0,30	0,01

4.2.3. Cálculo del DE.

Los daños y su probabilidad de excedencia se ajustaron bastante bien a una función de Distribución Logaritmo-Normal, lo cual permitió determinar matemáticamente el valor esperado de los daños, para cada condición del embalse.

Se aplicó la expresión siguiente, deducida en el desarrollo del trabajo:

$$\text{Daño Esperado} = e^{\mu - \frac{\sigma^2}{m}} \quad (3)$$

En que: μ y σ son los parámetros característicos de la función de Distribución Logaritmo-Normal.

C y m son dos Coeficientes de corrección obtenidos mediante una correlación.

Los resultados obtenidos se indican en la tabla N° 7.

TABLA N° 7

VALORES DE LOS DE

Volumen de Reserva para Control de Crecidas (mill.m ³).	Daños Esperados (mill. US\$)
0	0,895
50	0,014
100	0,001
150	0,000

4.3. Cálculo del BNE.

A partir de las tablas 4 y 7, y utilizando la ecuación (2), se determinó el BNE para diferentes niveles de entrega anuales y volúmenes de reserva para control de crecidas en el embalse Paloma, obteniéndose los resultados indicados en la figura N° 6.

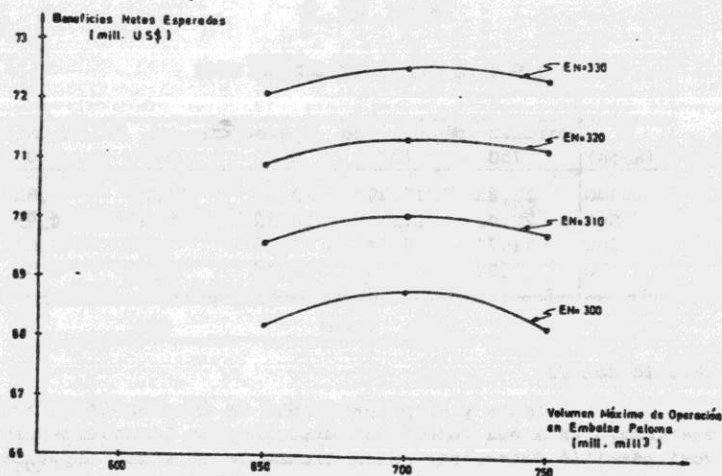


FIG. 6 REGLA DE OPERACION PROPUESTA: Elección del Volumen Óptimo en Embalse Paloma para Entregas Normales (EN) de 300, 310, 320 Y 330 mill. de m³.

FIGURA N° 6

5.- Conclusiones.

- La metodología desarrollada se aplicó al Sistema Paloma, considerando la mayor información pertinente que fue posible obtener. El análisis de los resultados obtenidos indica que se logró una adecuada representación de las características operacionales de las obras.
- Los daños que provocan las crecidas en las zonas adyacentes al río Grande y Limarí son considerables, pudiéndose evitar en gran parte con una pequeña disminución de la capacidad útil del embalse Paloma, en algunos meses.
- La operación del embalse Paloma con un volumen de reserva para control de crecidas en los meses de invierno, Mayo-Agosto, de hasta 100 millones de m³, no produce una disminución en las entregas actuales de agua del sistema ni en su seguridad considerables.
- La operación del embalse Paloma con un volumen de reserva para control de crecidas de 50 millones de m³, produce los mayores beneficios globales del sistema en el largo plazo.
- Los resultados obtenidos no pueden ser considerados como definitivos, debido a que el problema del río Limarí es un caso especial, en el cual es totalmente válido realizar consideraciones especiales, de tipo subjetivo. En consecuencia, el valor del BNE para cada volumen de reserva debe tomarse como un elemento más de una decisión global, que puede ser a nivel Regional o incluso Nacional.

BIBLIOGRAFIA

Rendel, Palmer y Tritton. (Londres). Informe sobre el Proyecto de Regadío y Desarrollo de la Paloma. República de Chile, Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Riego. 1967.

BF. Ingenieros Civiles. Estudio Hidrológico y Operacional del Sistema Paloma. Santiago, M.O.P., Dirección de Riego. 1976

BF. Ingenieros Civiles. Metodología de Pronósticos para el Sistema Paloma, M.O.P., Dirección de Riego. 1978

M.O.P., Dirección de Riego. Informe. Evaluación Preliminar de los Efectos de Crecidas del Río Grande-Limarí, aguas abajo del Embalse Paloma.

M.O.P., Dirección de Riego, Oficina de Agrología. Anexo de costos de producción por hectárea de los diferentes cultivos en el área de Punitaqui.

Ministerio de Agricultura, Oficina de Planificación Agrícola (ODEPA) Boletín de Precios Agrícolas. Marzo 1980.

M.O.P., Dirección de Riego, IV Región, Embalse Paloma. Encuesta Agrícola del Sistema Paloma, 1976-77.

Majluf. J. MPS. Procedimientos más usuales con ejemplos. Publicación N° 72/06/C. Departamento de Industrias, Universidad de Chile.

BF. Ingenieros Civiles. Operación del Sistema Paloma. Influencia de un volumen de Reserva para Crecidas. 1979.

BF. Ingenieros Civiles. Crecidas Pluviales Afluentes al Sistema Paloma. 1980.

Kaliski Enrique. Operación del Sistema Paloma Considerando Control de Crecidas. Memoria de Título. Universidad de Chile. 1981.

Hidroproyectos Ltda. Ingenieros Civiles. Embalse Paloma. Determinación Eje Hidráulico Río Grande-Limarí. 1980.