

- 17.-KAMMEL CARLOS, (1965), "Determinación de la superficie regada con 85% de seguridad por el río Elqui y otros", Dirección de Riego, M.O.P., pp 2-4.
- 18.-LEVY ALBERTO, (1950), "Hidráulica Agrícola", Escuela de Agronomía, U. de Chile, pp. 158-186.
- 19.-MONSALVE ABSALON, (1963), "Embalse la Puntilla y Pupío, Estudio Preliminar", Dirección de Riego. M.O.P.
- 20.-SALGADO LUIS, (1976) "Funciones de producción de maíz", V Seminario de Riego y Drenaje, Santiago, Chile.
- 21.-SILVA JORGE, (1973), "Proyecto embalse La Cerrada", Dirección de Riego, M.O.P., pp 127.
- 22.-SILVA J., SALGADO L., (1979). "Riego Fenológico del Maíz", U. de Concepción.
- 23.-TOLOSA JUAN, (1962), "Regulación embalse río Yeso", Dirección de Riego, M.O.P., pp 14.
- 24.-VAUX P. (1983), "Crop-Water Production Function", Advances in Irrigation, Volcani Center Institute of Irrigation, Israel, pp 61-95.
- 25.-VEGA SOLANO, (1957), "Anteproyecto de regadío de Curacaví y Casablanca", Dirección de Riego, M.O.P., Tomo I.
- 26.-VEGA S., FERRER P., (1973), "Criterios Generales para el dimensionamiento de obras de riego". Segundo Coloquio Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. pp 3-97 a 3-108.
- 27.-YARON D., BRESLER E. (1983). "Economic Analysis of an farm irrigation using response function on Crop", Advances of Irrigation, Academic Press, New York. NY Vol. 2, pp 223-255. (Publication Nº 1544, Institute of Soil and Water, Volcani, A.R.O., Israel)

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
VIII CONGRESO NACIONAL

MODELO DE PROGRAMACION MATEMATICA PARA LA ASIGNACION  
OPTIMA DE RECURSOS HIDRICOS CON FINES DE RIEGO

RODRIGO AREVALO C. (1)  
CRISTIAN MICHEL V. (1)  
GASTON GALLEGUILLOS B. (2)

RESUMEN

En el marco de una línea de investigación tendiente a la concepción y desarrollo de metodologías de optimización de variables de operación y diseño de sistemas de obras hidráulicas con fines de regadío, se abordó el problema de construir un modelo de optimización de la asignación mensual de agua de riego. Este está orientado a la maximización de los beneficios económicos de la producción agrícola anual de un valle.

La metodología está basada en la disponibilidad de un modelo de simulación. Este permite definir la denominada situación base de riego (riego con la situación hidrológica natural) y, además, aporta los parámetros y funciones de respuesta que modelan los aspectos de eficiencias de aplicación y conducción, reuso, derrames, regulación nocturna, etc. A partir de estos elementos se construyó un modelo de programación lineal que contempla una metodología para la asignación de caudales mensuales (variables de decisión) asociados a una producción anual, la que fue aplicada al proyecto de construcción de una Central de Bombeo en el Valle del Río Aconcagua.

(1) Ingeniero Civil. Investigador Ayudante Depto. Obras Civiles U.T.F.S.M.  
(2) Ingeniero Civil. Profesor Investigador Depto. Obras Civiles U.T.F.S.M.

## 1. INTRODUCCION

En los últimos estudios del regadío de los valles de nuestro país se ha recurrido al uso de modelos de simulación. Estos permiten representar la circulación y destino de los caudales que ingresan a las áreas de riego, y evaluar la producción agrícola derivada de la asignación del agua disponible mes a mes. Son, por lo tanto, poderosas herramientas de análisis y de evaluación de alternativas de proyectos de obras hidráulicas que promuevan el desarrollo agrícola.

La gran cantidad de variables involucradas en estos modelos hace impracticable, o al menos ineficiente, su uso directo en procesos de optimización de variables de diseño o de operación de sistemas de obras. Sin embargo, ellos ofrecen la posibilidad de contribuir con efectivos aportes a la concepción y desarrollo de metodologías de optimización con apego a la representación matemática de la realidad que ellos contienen.

En este trabajo se presenta una metodología de optimización económica de la asignación de caudales mensuales de riego a los distintos cultivos de los sectores de regadío de un valle. La metodología se ha concebido a partir de la disponibilidad de un detallado modelo de simulación agrohidrológica (Galleguillos et al, 1985) y ha conducido a una formulación de programación lineal que se ha aplicado en el Valle del río Aconcagua.

## 2. DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

### 2.1. Bases conceptuales

La metodología construida apunta a resolver el problema de definir la asignación mensual de agua de riego para maximizar el beneficio económico asociado a la producción agrícola anual. Esta última proviene de las cosechas de los distintos cultivos que tienen lugar en los sectores de riego en que se subdivide un valle, en conformidad a la disposición geográfica, estructura legal e infraestructura de riego existente.

Por lo tanto, uno de los problemas a resolver lo constituye la inexistencia de una relación directa entre los volúmenes de agua mensuales aplicados al rie-

go y el beneficio económico que de ellos se deriva.

Por otra parte, la metodología debe tomar en cuenta los efectos de reuso del agua dentro de un sector que se producen por el uso de derrames de riego intra sectoriales, así como la disponibilidad de agua derivada de los derrames de sectores de aguas arriba producida por incapacidad de regulación nocturna y por las ineficiencias de aplicación del agua de riego. La representación matemática de estos fenómenos es aportada por el modelo de simulación; sus ecuaciones, coeficientes y parámetros constituyen funciones de respuesta del sistema ante modificaciones en las variables de decisión que deben ser incorporadas a la metodología.

Por último, la metodología consulta la situación de optimización de una fuente de agua adicional a una situación base, o actual, en que la asignación de agua de riego se realiza de acuerdo con la estructura legal y de derechos de agua prevaleciente en el valle.

### 2.2. Situación base de riego.

Se denomina así a los caudales circulantes por los canales de riego y a las áreas regadas mensuales, para cada cultivo, por la escorrentía natural en las diferentes secciones de riego. En la determinación de esta situación, se respeta la condición actual de los usuarios en relación al recurso natural, asegurando de esta manera que sus producciones agrícolas serán mejoradas, o al menos mantenidas con los recursos adicionales.

El modelo de simulación permite definir los valores de caudales medios mensuales y áreas regadas para la situación base descrita. Estando este modelo constituido por un conjunto de ecuaciones lineales, el efecto hidrológico producido por las asignaciones de agua adicionales puede ser evaluado aplicando el principio de superposición válido para sistemas lineales.

### 2.3. Estructura de Demandas de Agua de Riego

La determinación de la situación base descrita precedentemente define la estructura de demanda potencial por recursos adicionales, a lo largo de la temporada de riego de cada cultivo.

En la Figura 1 siguiente se presenta gráficamente la situación base de área regada de un cultivo cualesquiera y la estructura de demanda asociada.

La función de demanda mensual de agua adicional de riego, dada la existencia de la situación base, presenta en general una estructura bilineal (Figura 2).

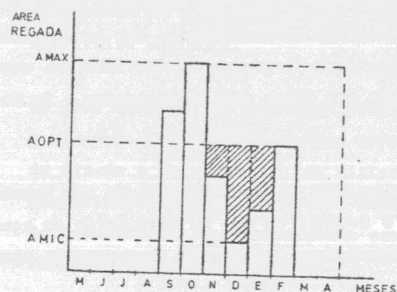


FIG. 1 DISTRIBUCION TEMPORAL DE AREAS REGADAS Y NIVEL OPTIMO A COSECHAR PARA UN CULTIVO.

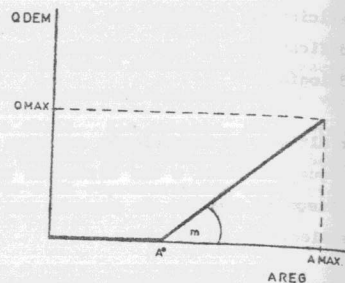


FIG. 2 DEMANDA POTENCIAL DE UN CULTIVO.

Matemáticamente esta demanda es:

$$QDEM = \frac{m}{2} (|Areg - A^*| + (Areg - A^*)) \quad (1)$$

donde:  $A^*$  : Área regada en la situación base

$Areg$  : Área regada del cultivo en el período

siendo  $m$  una cte. dependiente del coeficiente de consumo de los cultivos, de la evapotranspiración potencial, de las eficiencias de conducción, aplicación y regulación nocturna del recurso en el sector de riego.

Aplicando principios de programación separable es posible linealizar la función (1) por medio de una parametrización como la mencionada por Dorfman. (Maas et al. 1970).

#### 2.4. Efecto Temporal

Los efectos en las áreas regadas debido a la variabilidad natural del agua se presentan en la Figura 1. El área cosechada corresponde a la mínima área regada dentro del proceso vegetativo (AMIC). Esto se debe a que si cierta área no es regada en un mes se pierde su producción.

Como criterio básico de la metodología de optimización, y que permite resolver el problema de inexistencia de una función beneficios económicos vs. asignación mensual de agua de riego, se establece la inaplicabilidad de agua de riego adicional a un área de riego que posteriormente no sea cosechada por escasez en otros meses. Esto se logra imponiendo como variable de decisión a optimizar, al área cosechada de cada cultivo (AOPT), la que define las cantidades de agua a aplicar mes a mes también óptimas. (Figura 1).

Los beneficios económicos asociados a estas asignaciones serán los correspondientes a la diferencia entre el área óptima y el área mínima regada en la situación base. Esta diferencia es el área adicional cosechada derivada de la asignación de agua adicional de riego a lo largo del año, y cuando esta asignación ha sido necesaria.

#### 3. ESTRUCTURACION MATEMATICA DEL PROBLEMA

La técnica de programación matemática utilizada en la optimización es Programación Lineal. Si es posible linealizar todas las relaciones entre las variables de decisión tanto en las restricciones como en la función objetivo, esta técnica constituye una poderosa herramienta que permite la optimización de complejos sistemas de gran escala, que involucran un gran número de variables y restricciones.

A diferencia, de lo que ocurre con la mayoría de las otras técnicas de optimización, existe una gran cantidad de paquetes computacionales que resuelven eficientemente este tipo de problemas y están disponibles para el usuario en casi todos los computadores científicos del mundo.

La función objetivo del problema de asignación del recurso entre los diferentes usuarios es maximizar los beneficios económicos netos asociados a un determina-

do nivel de producción agrícola.

Los beneficios están asociados a las áreas cosechadas adicionales a través de los respectivos márgenes económicos brutos, estos es:

$$\text{Benef}_j = \text{MBU}_j \cdot (\text{ACOS}_j - \text{AMIC}_j)$$

donde:

- Benef<sub>j</sub> : beneficio asociado al cultivo j.  
 MBU<sub>j</sub> : margen bruto unitario del cultivo j.  
 ACOS<sub>j</sub> : área cosechada del cultivo j.  
 AMIC<sub>j</sub> : área mínima regada en situación base del cultivo j.

Además deben considerarse los costos asociados a la operación de la fuente que en forma general se pueden expresar por :

$$\text{COPF}_k = f(Q_k)$$

en que :

- COPF<sub>k</sub> : costo operación de la fuente en el período k.  
 Q<sub>k</sub> : caudal entregado por la fuente en el período k.

Estos costos deben ser funciones lineales o al menos linealizables.

Además, deben considerarse los costos de falla de los cultivos asociados a las pérdidas de producción agrícola del área que no fue regada, durante algún tiempo.

La función objetivo global del sistema puede plantearse por :

$$\max. Z = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NCS} \text{MBU}_{i,j} (\text{ACOS}_{i,j} - \text{AMIC}_{i,j}) - \sum_k \text{COPF}_k - \sum_{i=1}^{NS} \sum_{j=1}^{NCS} \text{CFALLA}_{i,j}$$

donde :

- Z : función objetivo del sistema  
 NCS : número de cultivos por sector de riego  
 NS : número de sectores del sistema  
 CFALLA<sub>i,j</sub> : costo de falla del cultivo j del sector i (cultivos permanentes)

Se distinguen diversos tipos de restricciones en el sistema, que pueden clasificarse en 6 grupos :

- i) Restricción de la fuente: Deben respetarse las capacidades de la fuente, así como también su capacidad de descarga.
- ii) Restricción de área cosechada: Las áreas cosechadas anuales, deben limitarse al área máxima disponible por cultivo.
- iii) Restricción de capacidad de canales: El caudal total captado por los elementos de conducción-situación base más recurso adicional- no debe exceder sus capacidades físicas de conducción.
- iv) Restricción de continuidad: Se debe satisfacer la ecuación de continuidad en cada uno de los elementos del sistema.
- v) Restricción de áreas iguales: Dada la condición de aprovechamiento óptimo del recurso adicional, debe imponerse la igualdad de áreas regadas en cada cultivo.
- vi) Restricciones de Linealización: Se incluyen todas las restricciones asociadas a las técnicas de linealización utilizadas en las funciones no lineales del sistema.

#### 4. APLICACION AL VALLE DEL RIO ACONCAGUA

En este valle se ha planteado la alternativa de construir una Planta de Bombeo en la 10<sup>a</sup> Sección de Riego para abastecer a las Secciones ubicadas aguas abajo de San Felipe (Cica, B&P, CNR, 1983). Este hecho, sumado a la disponibilidad del modelo de simulación referido, motivó su selección para probar la aplicación de la metodología en un sistema de gran escala.

La Figura 3 contiene la estructura de modelación del caso que se presenta, determinada a partir del modelo de simulación. El sistema está compuesto por 13 sectores de riego y un promedio de 18 cultivos por sector.

El tamaño del problema a resolver es determinado, a partir de la situación base, mediante algoritmos de pre-proceso que eliminan información y variables redundantes. Se presentan a continuación, sobre la base de información agronómica no actualizada, los resultados arrojados por el modelo de optimización para el caso del año hidrológico 1964/1965, el que constituye un problema de 350 variables y 250 restricciones.

Las decisiones respecto de la operación óptima de la Planta de Bombeo para capacidades instaladas de 1,5; 3 y 5 [m<sup>3</sup>/s] se presentan en la Figura 4. En ella se observa que el mes de Enero requiere la operación de la planta a plena capacidad y, naturalmente esto constituye un factor determinante de las áreas cosechadas y de las necesidades de bombeo en el resto del período de riego.

La Figura 5 muestra gráficamente la situación base de un cultivo (tomate) en el sector 13 (Quillota) y la decisión de área óptima cosechada, la que requiere de asignación de agua de bombeo en los meses de Diciembre y Enero.

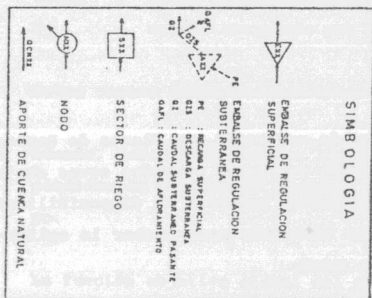
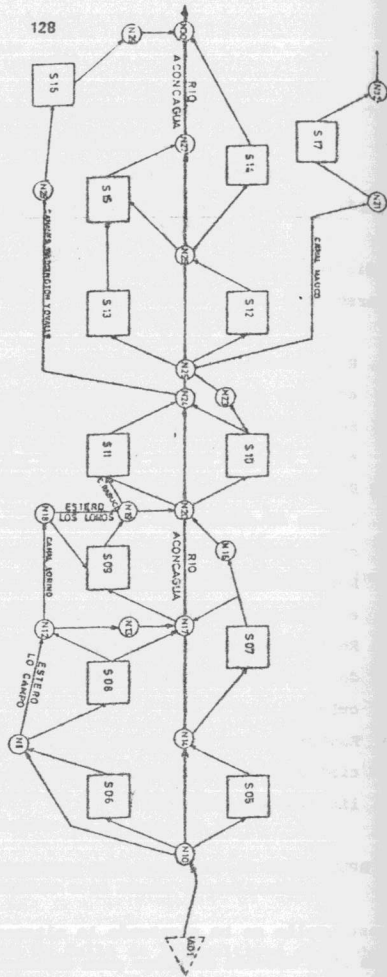


FIG. 3 ESTRUCTURACION CONCEPTUAL PARA LA OPTIMIZACION.

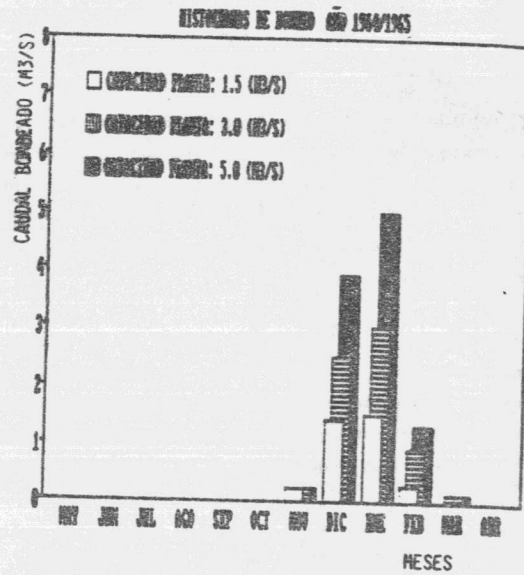


FIG. 4 OPERACION OPTIMA DE LA PLANTA DE BOMBEO PARA DIFERENTES CAPACIDADES.

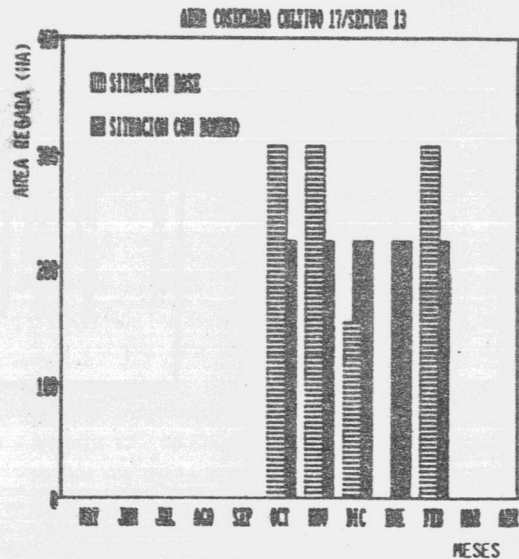


FIG. 5 NIVEL OPTIMO DE AREA A COSECHAR.

En la Tabla 1, a título ilustrativo, se presentan los resultados correspondientes a un sector, en que los cultivos han sido ordenados de menor a mayor rentabilidad relativa. Ella contiene los valores de áreas cosechadas óptimas encontradas por el modelo de optimización, observándose en este caso una

CULTIVO	COEF. CONSUMO DICIEMBRE	MARGEN ECONOMICO BRUTO [miles US\$/Ha]	AREA TOTAL DISPONIBLE [Ha]	COSECHADAS PARA CAP. PLANTA		
				1.5 [m <sup>3</sup> /s]	3.0	5.0
3 MAIZ	0.96	0.161	31	0	0	0
4 LEGUM	0.90	0.115	50	0	0	0
5 CHCL	0.98	0.244	325	0	0	0
6 PAPA	1.06	0.417	34	0	0	21
7 CEBDA	0.20	0.052	24	24	24	24
8 TRGO	0.20	0.101	84	84	84	84
12 MAFI	0.90	0.384	78	0	0	0
18 CEREZ	0.73	0.852	200	200	200	200
14 CBLL	0.85	0.491	400	0	0	400
17 TRBE	0.84	0.614	306	0	223	306
18 TRCO	0.66	0.502	15	0	0	15
20 ALCP	0.80	2.165	602	602	602	602

preponderancia de situación de riego total de algunos cultivos y descarte de otros. Se observa además que el modelo conduce a decisiones no triviales en cuanto a la selección de cultivos y a áreas cosechadas.

Finalmente, insinuando la aplicación del modelo para su uso en la selección del tamaño óptimo de la planta de bombeo, se presenta en la Figura 6 la curva de beneficios netos anuales derivados de la operación óptima de Plantas de Bombeo de distintas capacidades. La obtención de esta información para los años de vida útil de la Planta de Bombeo, y la consideración de los montos de inversión correspondientes permitiría determinar el tamaño óptimo de la planta.

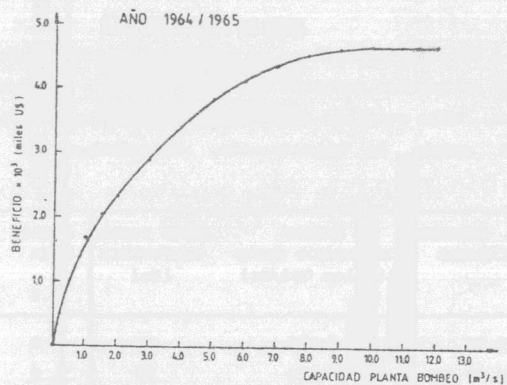


FIG. 6 BENEFICIO NETO OPTIMO DEL SISTEMA PARA DIFERENTES CAPACIDADES DE PLANTA.

## 5. CONCLUSIONES

La metodología descrita para la optimización de la asignación de agua de riego derivada de la operación de una fuente adicional, ha resuelto satisfactoriamente los problemas característicos que presentan los sistemas agrohidrológicos. Su aplicación a un sistema complejo y de gran escala como el valle del río Aconcagua, ha puesto de manifiesto su potencial como herramienta útil para propósitos de optimización de la operación de un sistema proyectado de obras hidráulicas, con miras a definir el tamaño de sus elementos componentes, en una perspectiva optimizante.

La metodología diseñada permite obtener decisiones optimizadas de los caudales de riego mensuales, en función de la definición de una situación base más el criterio elemental de no regar con agua adicional áreas de cultivos que no podrán ser cosechadas. Se destacan los aportes que se obtienen de la construcción de un modelo de simulación para la concepción metodológica presentada. Esta última a su vez, responde adecuadamente al interés de maximizar la utilización del modelo de simulación para la selección y evaluación de proyectos de obras hidráulicas de regadío.

Se menciona, finalmente que si bien las decisiones corresponden a un caso determinístico - serie hidrológica conocida - se estima que esto no conspira contra el propósito de aplicación de la metodología que se ha señalado. Esta condición es frecuentemente aplicada en casos de selección y evaluación de proyectos de riego, en que se actúa bajo la hipótesis de invarianza de los parámetros estadísticos principales de una serie hidrológica histórica.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto de Investigación "Análisis de Sistema Aplicado a la Selección de Alternativas de Desarrollo Agrohidrológico" financiado por la Universidad Técnica Federico Santa María y por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CICA, BINNIE & PARTNERS, HUNTING TECHNICAL SERVICES, Comisión Nacional de Riego de Chile (1983). Estudio integral de riego de los valles Aconcagua, Putaendo, Ligua y Petorca. Vols. I, II, III, IV, V y VI. República de Chile.
- GALLEGUILLOS, G., G. MENDEZ Y A. LUCCHINI, (1985). "MOSAH. An agrohydrological simulation model". IFAC Conference on Systems Analysis Applied to Water and Related Land Resources. Lisboa, Portugal.
- MAASS, A., M. HUFSCHMIDT, R. DORFMAN ET AL. (1970). "Design of water Resource Systems". HARVARD University Press, Cambridge, Massachusetts, 620 p.