

# MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS PARA UN DISTRITO DE RIEGO

## Model for the Optimization of Resources for an Irrigation District

David Ortega-Gaucin<sup>1</sup>, Enrique Mejía Sáenz<sup>2†</sup>, Enrique Palacios Vélez<sup>2</sup>,  
Luis Rendón Pimentel<sup>1</sup> y Adolfo Exebio García<sup>2</sup>

### RESUMEN

Mediante el uso de técnicas de programación lineal se desarrolló un modelo de optimización de recursos hídricos para el distrito de riego 005, localizado en Delicias, Chihuahua, México. El modelo planteado permitió estimar la superficie de riego y el patrón de cultivos óptimo para incrementar los beneficios netos de los productores. Se analizaron cuatro escenarios posibles, tomando en cuenta la disponibilidad de volúmenes clave en las fuentes de abastecimiento de agua, así como dos eficiencias de conducción de la red de canales. Los resultados indicaron que la superficie sembrada en el distrito fue de 70 459 ha. La superficie estimada por el modelo fue menor de 9643 ha con respecto a la superficie regable actualmente; por lo cual se concluye que es conveniente establecer estrategias para que, en situaciones próximas, la superficie excedente sea desincorporada del distrito de riego, o bien, reducir la concesión de agua con la finalidad de lograr la sustentabilidad de los módulos.

**Palabras clave:** *producción agrícola, productividad, reconversión productiva, programación lineal, gestión de recursos hídricos.*

### SUMMARY

Using linear programming techniques, a model for optimizing water resources was developed for the Irrigation District 005, located in Delicias, Chihuahua, Mexico. The proposed model allowed estimation of the irrigation area and optimal cropping pattern needed to increase net benefits for growers. Four possible scenarios

were analyzed, considering the availability of key volumes in water supply sources, as well as two conduction efficiencies for the network of irrigation channels. The results indicated that the area cultivated in the Irrigation District was 79 459 ha. The area estimated by the model was 9643 ha less than the area currently irrigation. It is thus concluded that it would be recommendable to establish strategies for withdrawing the excess area from the Irrigation District or for reducing water concessions in order to achieve sustainability of the modules.

**Index words:** *agricultural production, productivity, productive reconversion, linear programming, water resource management.*

### INTRODUCCIÓN

La sequía es un fenómeno que tiene efectos negativos sobre la agricultura, en especial incide en la agricultura de riego, pues la mayor parte del tiempo no se maneja adecuadamente el agua de las presas. En ellas se utiliza el agua indiscriminadamente, lo cual tiene un costo considerable, ya que el valor producido por el agua que se extrae en volúmenes mayores que la disponibilidad media de las cuencas, es mínimo, comparado con el que podría producir si ese volumen se guardara para épocas de escasez (Mejía-Saenz *et al.*, 2002).

El fenómeno de sequía que se ha presentado en los últimos años en la cuenca del río Conchos ha tenido incidencia directa y consecuencias negativas en todos los distritos de riego que se ubican en su territorio, pero en particular en el Distrito de Riego 005 Delicias. En este lugar, las presas de almacenamiento La Boquilla y Francisco I. Madero constituyen el sistema de captación y aprovechamiento de agua para riego más importante del estado de Chihuahua. El último período de sequía, que ya se extiende por más de una década, ha provocado una gran reducción de la captación de agua en dichas presas; tal como sucedió en el ciclo agrícola 1994-1995,

<sup>1</sup> Comisión Nacional del Agua. Insurgentes Sur 2416. 04340 México, D. F.

<sup>2</sup> Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, Estado de México.

<sup>†</sup> Autor responsable (mejiasae@colpos.mx)

cuando éstas no se abrieron al riego por no alcanzar los niveles mínimos de operación (CNA-IMTA, 2005). En ese ciclo, el déficit en la disponibilidad de aguas superficiales se cubrió de manera parcial, lo cual provocó el aumento de extracciones del acuífero y su consecuente abatimiento al habilitarse 286 pozos profundos (Velasco-Velasco, 1996). Como consecuencia de la baja disponibilidad de agua para riego, la superficie sembrada en el distrito ha disminuido drásticamente, regándose en promedio, durante la última década, sólo el 40.5% de la superficie total (CNA-IMTA, 2005). Ello ha obligado a los agricultores a sembrar sólo los cultivos más rentables y con mayor productividad del agua. Asimismo, la escasez del líquido ha ocasionado la disminución del número de ciclos de riego, propiciando la desaparición de los cultivos de otoño-invierno y segundos cultivos. De esta manera y como mencionan Cruz-León y Bielsa-Callau (2001), los problemas de baja eficiencia de riego a nivel parcela y la falta de flexibilidad en la distribución deben encaminarse a la implantación de sistemas más eficientes de aplicación de agua en parcela y al conocimiento de la demanda hídrica (su cantidad y distribución en el tiempo). En general, el incremento de la eficiencia de riego puede elevar la cantidad de agua disponible y utilizarla para cubrir las necesidades hídricas de la zona de riego.

En este sentido, con el propósito de mitigar los impactos de la sequía en la cuenca del río Conchos y a su vez, con la finalidad de saldar los adeudos de agua que México tiene con Estados Unidos (Tratado Internacional de Límites y Aguas de 1944 (SRE, 2007)), el Gobierno Federal, a través de la Comisión Nacional del Agua (CNA), puso en marcha, a partir del ciclo agrícola 2002-2003, el Programa de Uso Sustentable del Agua en la Cuenca del Conchos (PUSACC). Este programa contempla, dentro de sus acciones principales, la modernización y tecnificación de los distritos de riego que se ubican en la cuenca y su redimensionamiento para equilibrar la oferta de agua superficial con la demanda, así como la adquisición de los derechos de riego de la superficie excedente (CNA, 2002).

En este contexto, una alternativa al problema de determinar la superficie regable y el patrón de cultivos que maximizan los ingresos netos de los productores de un distrito puede ser el uso de la programación lineal, ya que es una herramienta útil para realizar la planeación de actividades en las unidades de producción, en el uso y la combinación de recursos entre distintas actividades alternativas para cumplir con un objetivo de optimización

(Bueno, 1990). Muchos sistemas de producción pueden ser representados por un modelo de programación lineal, el cual permite conocer los valores de las variables, o actividades en el proceso de producción, que optimizan (maximizan o minimizan) el funcionamiento del sistema (Palacios-Vélez y Exebio-García, 1989).

La teoría de la programación lineal se ha desarrollado para facilitar la búsqueda de una respuesta al problema de elegir entre formas alternativas de producción, que logren el uso más eficiente de los recursos. Con respecto a la solución de problemas agrícolas, se puede utilizar para determinar planes óptimos de cultivos sobre la base de niveles determinados de recursos (Bueno, 1990). Una ventaja del uso de esta metodología en la planeación de distritos de riego es que permite determinar el patrón de cultivos que maximiza el ingreso neto de los productores dado un conjunto de restricciones (Florencio-Cruz *et al.*, 2002).

En el presente trabajo se planteó la utilización de un modelo de programación lineal con enfoque analítico; es decir, que tuvo como objetivo definir el patrón de cultivos y optimizar el sistema de almacenamiento utilizado para obtener el beneficio neto de los productores, bajo diferentes escenarios de disponibilidad de agua. En este modelo se partió de la hipótesis de que es posible estimar la superficie regable y el patrón de cultivos óptimo de un distrito de riego.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El distrito de riego 005 Delicias se localiza en la zona centro-sur del estado de Chihuahua (Figura 1), y tiene como coordenadas geográficas medias 28° 11' N y 105° 28' O, con una altitud media de 1165 m. El clima de la región donde se ubica el distrito es semidesértico, con una precipitación media de 350 mm anuales (García, 1988).

El distrito está constituido por 10 módulos de riego que son operados, conservados y administrados por los propios usuarios organizados en Asociaciones Civiles. Para fines operativos, el distrito se divide en dos unidades de riego constituidas con base en las características de la infraestructura, a manera de facilitar la entrega, medición y distribución del agua así como la conservación de las obras. Cada unidad es administrada por una Sociedad de Responsabilidad Limitada (SRL) que se integra de la siguiente manera: a) La primera unidad denominada Conchos se conforma por los módulos de riego 1, 2, 3, 4, 5 y 12, que principalmente son

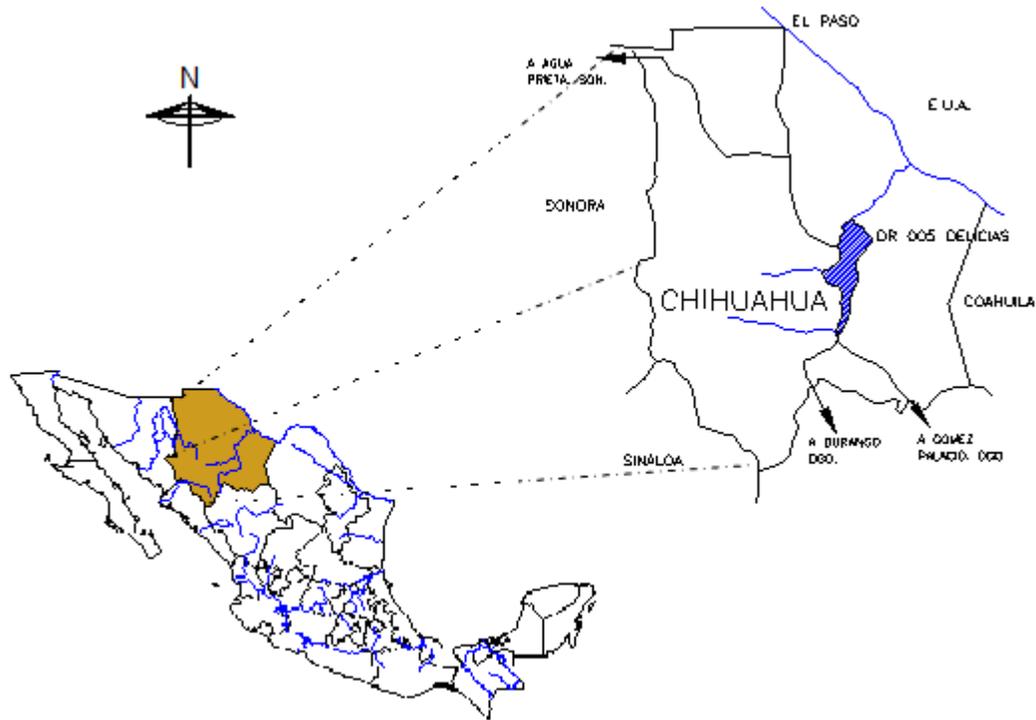


Figura 1. Ubicación del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua.

abastecidos con las aguas de la presa La Boquilla; b) La segunda unidad, denominada San Pedro se integra por los módulos de riego 6, 7, 8 y 9, que son abastecidos con las aguas de la presa Francisco I. Madero, con las aguas del subsuelo y, en menor escala, con volúmenes de apoyo provenientes de la presa La Boquilla (DR 005, 2000).

**Planteamiento del Modelo**

**Cultivos seleccionados.** Los principales cultivos del distrito de riego que se han establecido de manera constante durante los últimos diez ciclos agrícolas, mismos que integran el modelo de optimización planteado, se presentan en el Cuadro 1. La información de precios, rendimientos y costos de producción corresponde al ciclo agrícola 1993-1994, el cual se ha seleccionado como año base, debido a que en ese ciclo se estableció un patrón de cultivos considerado como normal en toda la superficie del distrito (DR 005, 2000).

**Restricciones.** Se incluyen restricciones en la disponibilidad de los recursos que son fundamentales en el proceso productivo: la tierra y el agua. Además, con la finalidad de crear escenarios lo más cercano posible a la realidad, también se incluyen algunas restricciones que regulan la producción de cultivos.

**Tierra.** La superficie regable del distrito es 80 102 ha, que se distribuyen de la siguiente manera: 40 363 ha corresponden a la unidad Conchos y 39 739 ha pertenecen a la unidad San Pedro. Estos datos son los que se toman como superficies máximas a sembrar en el distrito y en cada unidad de riego.

**Volumen de agua disponible anualmente.** El volumen total de agua disponible en la presa La Boquilla se asigna de la siguiente manera: 33% para uso doméstico; 51.5% para el riego agrícola de la unidad Conchos, y el restante 15.5% como apoyo para el riego agrícola de la unidad San Pedro. En cuanto al volumen disponible en la presa Francisco I. Madero, la totalidad se destina para el riego de la unidad San Pedro, al cual se le adiciona el volumen de apoyo proveniente de la presa La Boquilla y el volumen extraído de aguas subterráneas mediante pozos profundos.

El volumen total concesionado e inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) es de 1130.5 hm<sup>3</sup>; de los cuales 941.6 hm<sup>3</sup> corresponden a aguas superficiales, considerado a nivel de punto de control, y 188.9 hm<sup>3</sup> corresponden a aguas subterráneas. Para proporcionar el volumen de aguas superficiales se quiere extraer, en promedio, 1322.8 hm<sup>3</sup> de los almacenamientos, los cuales incluyen los volúmenes para

**Cuadro 1. Información de producción agrícola en el distrito de riego 005 Delicias, Chih.†**

Cultivo	Precio medio rural	Rendimiento	Beneficio bruto	Costos de producción	Beneficio neto
	\$ Mg <sup>-1</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>	- - - - -	\$ ha <sup>-1</sup> - - - - -	- - - - -
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	342	12.6	4 312	1880	2 432
Algodón ( <i>Gossypium hirsutum</i> )	1725	2.3	3 968	1343	2 625
Avena ( <i>Avena sativa</i> )	334	4.5	1 503	678	825
Cacahuete ( <i>Arachis hypogaea</i> )	3072	2	6 133	2001	4 132
Cebolla ( <i>Allium cepa</i> )	374	32.3	12 094	2736	9 358
Chile verde ( <i>Capsicum annuum</i> )	1300	15	19 498	4263	15 235
Frijol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	2615	1.1	2 870	1985	885
Maíz ( <i>Zea mays</i> )	613	3.5	2 174	1182	992
Nogal ( <i>Juglans regia</i> )	8176	1.3	10 628	2303	8 325
Otras Hortalizas	765	12.2	9 332	2078	7 254
Pastizales	80	51.2	4 096	2571	1 525
Sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> )	448	3	1 359	603	756
Soya ( <i>Glycine max</i> )	1131	1.8	2 019	1094	925
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	621	5.3	3 298	1771	1 527
Vid ( <i>Vitis vinifera</i> )	864	10.8	9 334	1820	7 245

† Fuente: de CNA (1994).

el uso doméstico (20.0 hm<sup>3</sup>), para las unidades de riego conocidas como Labores Viejas (123.3 hm<sup>3</sup>) y para riego a nivel de punto de control.

**Demandas mensuales de agua.** Los requerimientos mensuales de riego por cultivo para cada unidad de riego se determinan con base en los volúmenes servidos, en promedio en los últimos cinco años a nivel toma granja para regar los cultivos, de acuerdo con la expresión 1 (Palacios y Exebio, 1989):

$$CUR_{ij} = \frac{V_{ij} / S_i}{Ec_j} \quad (1)$$

donde:  $CUR_{ij}$  = requerimiento de agua mensual del cultivo  $i$  en el mes  $j$ ;  $V_{ij}$  = volumen servido al cultivo  $i$  en el mes  $j$ , miles de m<sup>3</sup>;  $S_i$  = superficie regada del cultivo  $i$  en el ciclo agrícola, ha;  $Ec_j$  = eficiencia de conducción de la unidad de riego, adimensional.

Por otro lado, con respecto a las demandas mensuales de agua para otros usos (doméstico y fuera del distrito), la distribución porcentual por mes se calcula como un promedio de los volúmenes mensuales utilizados para cada uso en los últimos diez años agrícolas.

**Capacidad máxima de conducción.** El volumen máximo mensual que puede conducir la red de canales del distrito de riego se ha estimado en función de los canales principales Conchos y San Pedro, que conducen

el agua hacia las unidades de riego del mismo nombre, respectivamente. El canal principal Conchos se abastece de la presa La Boquilla y tiene una capacidad de conducción de 70 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> que equivalen aproximadamente a 181.44 hm<sup>3</sup> al mes. Por su parte, el canal principal San Pedro se abastece de la presa Francisco I. Madero, así como del volumen de auxilio proveniente de la presa La Boquilla, y tiene una capacidad de conducción de 40 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> que equivalen aproximadamente a 103.68 hm<sup>3</sup> al mes.

**Capacidad máxima de bombeo.** El distrito tiene 140 pozos profundos con una capacidad instalada de bombeo de 7155 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> que equivale a 18.5 hm<sup>3</sup> al mes, considerando un esquema de operación 30 días al mes y 24 h por día.

**Restricciones a la producción de cultivos.** Con el propósito de encontrar un equilibrio en la producción de cultivos y evitar sesgos en los resultados arrojados por el modelo, con tendencias a sembrar sólo los cultivos más rentables, se establecen límites a las superficies máximas de los cultivos de chile, cebolla, cacahuete y algodón, considerando los valores máximos registrados en la última década para cada una de las unidades de riego del distrito. Para el caso de los cultivos perennes (alfalfa, nogal y vid), se define como superficie mínima a sembrar la registrada en el año agrícola inmediato anterior (2004-2005), para asegurar la producción de los cultivos vigentes, pero se establece un límite

de superficie máxima, debido a que consumen mucha agua, para lo cual se utiliza el valor promedio registrado en los últimos 10 años agrícolas en cada unidad de riego. La superficie mínima destinada a la producción de granos (maíz, trigo, sorgo y avena) se determina en función de la superficie sembrada promedio en los últimos 10 años agrícolas en cada unidad de riego del distrito. A continuación se resume, en forma matemática, el modelo de optimización planteado de acuerdo con el modelo de maximización de beneficios señalado por Palacios y Exebio (1989).

**El modelo de optimización**

Función objetivo:

$$Max \quad BN = \sum_{i=1}^{ND} Bn_i S_i = \sum_{i=1}^{NC} Bn_i S_i + \sum_{i=1}^{NP} Bn_i S_i \quad (2)$$

Restricciones:

$$\sum_{i=1}^{NC} S_i \leq SUC \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{NP} S_i \leq SUP \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{NC} S_i + \sum_{i=1}^{NP} S_i = \sum_{i=1}^{ND} S_i \leq SDR \quad (5)$$

$$VRC_j + VUD_j + VLV_j + VAP_j \leq VB \quad (6)$$

$$VRP_j \leq VPP_j + VAP_j + VM \quad (7)$$

$$VB_j \leq CPC_j \quad (8)$$

$$VM_j \leq CPP_j \quad (9)$$

$$VPP_j \leq CBP_j \quad (10)$$

$$S_{i \geq} \leq RC_i \quad (11)$$

$$S_{i \geq} \leq RP_i \quad (12)$$

donde:

$$Bn_i = R_i * P_i - CP_i \quad (14)$$

$$ND = NC + NP \quad (15)$$

$$VRC_j = \sum_{i=1}^{NC} CURC_{ij} S_i \quad (16)$$

$$VRP_j = \sum_{i=1}^{NP} CURP_{ij} S_i \quad (17)$$

donde:

*BN* = beneficio neto total, \$; *Bn<sub>i</sub>* = beneficio neto del cultivo *i*, \$ ha<sup>-1</sup>; *S<sub>i</sub>* = superficie a sembrar del cultivo *i*, ha; *ND* = número de cultivos del distrito de riego 005 Delicias en un año agrícola, adimensional; *NC* = número de cultivos de la unidad Conchos en un año agrícola, adimensional; *NP* = número de cultivos de la unidad San Pedro en un año agrícola, adimensional; *R<sub>i</sub>* = rendimiento del cultivo *i*, Mg ha<sup>-1</sup>; *P<sub>i</sub>* = precio medio rural del cultivo *i*, Mg ha<sup>-1</sup>; *CP<sub>i</sub>* = costos de producción del cultivo *i*, \$ ha<sup>-1</sup>; *SUC* = superficie total regable de la unidad Conchos, ha; *SUP* = superficie total regable de la unidad San Pedro, ha; *SDR* = superficie total regable del distrito de riego 005 Delicias, ha; *VRC<sub>j</sub>* = volumen para riego de la unidad Conchos en el mes *j*, hm<sup>3</sup>; *VOU<sub>j</sub>* = volumen para uso doméstico en el mes *j*, hm<sup>3</sup>; *VLV<sub>j</sub>* = volumen para labores viejas (fuera del distrito) en el mes *j*, hm<sup>3</sup>; *VAP<sub>j</sub>* = volumen para la unidad San Pedro en el mes *j*, hm<sup>3</sup>; *VB* = volumen anual a extraer de la presa La Boquilla, hm<sup>3</sup>; *CURC<sub>ij</sub>* = coeficiente unitario de requerimiento bruto de riego del cultivo *i* en el mes *j*, para la unidad Conchos, adimensional; *CURP<sub>ij</sub>* = coeficiente unitario de requerimiento bruto de riego del cultivo *i* en el mes *j*, para la unidad San Pedro, adimensional; *VRP<sub>j</sub>* = volumen para riego de la unidad San Pedro en el mes *j*, hm<sup>3</sup>; *VPP* = volumen anual a extraer de pozos, hm<sup>3</sup>; *VAP* = volumen anual de apoyo de la presa La Boquilla, hm<sup>3</sup>; *VF* = volumen anual a extraer de la presa Francisco I. Madero, hm<sup>3</sup>; *CPC<sub>j</sub>* = capacidad del canal principal Conchos para todo mes *j*, hm<sup>3</sup>; *CPP<sub>j</sub>* = capacidad del canal principal San Pedro para todo mes *j*, hm<sup>3</sup>; *CBP<sub>j</sub>* = capacidad de bombeo de los pozos para todo mes *j*, hm<sup>3</sup>; *RC<sub>i</sub>* = restricción a la producción del cultivo *i* en la unidad Conchos, ha; *RP<sub>i</sub>* = restricción a la producción del cultivo *i* en la unidad San Pedro, ha; *i* = índice de número de cultivos, adimensional (*i* = 1, 2, 3, ...*ND*); *j* = índice de meses del año, adimensional (*j* = 1, 2, 3, ...*12*).

El modelo planteado se resuelve tomando en consideración los volúmenes anuales máximos disponibles y las eficiencias de conducción de acuerdo con los escenarios que se describen a continuación.

**Cuadro 2. Escenarios planteados en el modelo de optimización.**

Escenario	Volumen disponible por fuente de abastecimiento (hm <sup>3</sup> ) <sup>†</sup>			
	La Boquilla	Francisco I. Madero	Pozos oficiales	Total
1 Volúmenes utilizados en promedio en los últimos diez años agrícolas (1994-1995 al 2003-2004).	474.2	146.5	67.2	687.9
2 Volúmenes autorizados a extraer para el plan de riegos 2005-2006.	750.0	185.0	55.0	990.0
3 Volúmenes sustentables estimados por la gerencia de distritos y unidades de riego.	831.8	216.0	90.0	1137.8
4 Volúmenes concesionados a nivel de fuentes de abastecimiento.	1077.0	245.7	188.9	1511.6

<sup>†</sup> Información tomada de CNA-IMTA (2005).

### Escenarios Planteados

Se analizan cuatro escenarios posibles tomando en cuenta volúmenes clave disponibles en las fuentes de abastecimiento, como se muestra en el Cuadro 2.

Asimismo, para cada uno de los escenarios de volúmenes disponibles, planteados anteriormente, se analizan dos eficiencias de conducción: la eficiencia de conducción actual (60.1%), y la eficiencia de conducción estimada. Esta última se dará a conocer una vez que terminen las obras de revestimiento de canales contempladas en el PUSACC (66.7%). Con estas dos eficiencias de conducción se calculan los coeficientes unitarios de requerimiento de riego de los cultivos en la condición actual y futura.

Para resolver el modelo se utiliza el módulo Solver del sistema de cómputo Microsoft Office Excel 2003®, el cual permite resolver problemas de programación lineal utilizando el método Simplex modificado.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del modelo de optimización planteado para los cuatro niveles de disponibilidad de agua y las dos eficiencias de conducción analizadas, se presentan en el Cuadro 3. En éste se pueden observar los patrones de cultivo que maximizan el ingreso neto de los productores del distrito para cada escenario trazado.

Se observó que el incremento en la eficiencia de conducción derivado del revestimiento de la red de conducción permite una mayor disponibilidad de agua para riego y el rescate de volúmenes que antes se infiltraban durante la conducción. Manteniendo constantes los volúmenes de agua disponibles para riego en cada escenario propuesto, se logrará incrementar

la superficie cosechada y se diversificará la composición del patrón de cultivos, lo cual incidirá directamente en el beneficio neto por unidad de volumen.

Respecto al volumen utilizado, se observa que conforme se utiliza mayor cantidad de agua, el beneficio neto obtenido por unidad de volumen disminuye. Lo anterior explica que, al haber escasez de agua, se utilice sólo para regar los cultivos más rentables hasta que se agota la superficie. De esta manera, el incremento logrado por cada unidad de agua es considerable; aunque conforme se dispone de más agua, se riegan cultivos menos redituables, de tal manera que el incremento en beneficio producido por unidad adicional de agua es cada vez menor.

El primer escenario planteado en el modelo de optimización muestra un incremento de 4441 ha de superficie regada, con el incremento de la eficiencia de conducción, y de 16.10 millones de pesos en beneficio neto, mientras que en el segundo escenario, el incremento en superficie es de 12 824 ha de superficie regada y 15.20 millones de pesos en beneficio neto. El tercer escenario (volumen sustentable) muestra incremento en 5999 ha de superficie regada y 16.40 millones de pesos en beneficio neto. Finalmente, el cuarto escenario muestra un incremento de 18 891 ha de superficie regada y 25.10 millones de pesos en beneficio neto.

Resulta ventajoso utilizar agua para riego sólo hasta donde el incremento en beneficio sea considerable. En este caso, el límite oscila entre 900 y 1100 hm<sup>3</sup> (tomando en cuenta el agua de presas y pozos profundos en conjunto), ya que antes de los 900 hm<sup>3</sup> el incremento en beneficio por unidad adicional de agua es alto. Después de 1100 hm<sup>3</sup> se excede el volumen de agua de riego concesionado al distrito de riego y el beneficio comienza a disminuir de manera drástica, obteniéndose por

**Cuadro 3. Patrones de cultivo obtenidos mediante el modelo de optimización.**

Cultivo	Eficiencia de conducción actual (60.1%)				Eficiencia de conducción al finalizar las obras del PUSACC (66.7%)			
	Escenarios				Escenarios			
	1	2	3	4	1	2	3	4
	----- Superficie (ha) -----				----- Superficie (ha) -----			
Alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> )	3 074	3 074	4 186	14 283	3 074	3 074	9 365	19 756
Algodón ( <i>Gossypium hirsutum</i> )	3 578	6 519	6 600	6 600	3 578	6 600	6 600	6 600
Avena ( <i>Avena sativa</i> )	498	498	498	745	498	498	498	7 204
Cacahuete ( <i>Arachis hypogaea</i> )	5 829	9 313	9 313	9 313	5 829	9 313	9 313	9 313
Cebolla ( <i>Allium cepa</i> )	1 322	1 322	1 322	1 322	1 322	1 322	1 322	1 322
Chile verde ( <i>Capsicum annuum</i> )	6 301	6 301	6 301	6 301	6 301	6 301	6 301	6 301
Frijol ( <i>Phaseolus vulgaris</i> )	29	29	29	29	29	29	29	29
Maíz ( <i>Zea mays</i> )	4 031	4 031	4 031	4 031	4 031	4 031	4 031	4 031
Nogal ( <i>Juglans regia</i> )	4 103	4 679	4 679	4 679	4 679	4 679	4 679	4 679
Otras Hortalizas	2 100	3 600	3 600	3 600	3 035	3 600	3 600	3 600
Pastizales	0	1 111	1 111	2 737	0	1 111	2 737	2 737
Sorgo ( <i>Sorghum vulgare</i> )	110	110	110	110	110	110	110	110
Soya ( <i>Glycine max</i> )	328	2 443	10 672	10 353	328	9 826	6 489	17 312
Trigo ( <i>Triticum aestivum</i> )	2 743	7 500	11 761	15 138	5 660	12 860	15 138	15 138
Vid ( <i>Vitis vinifera</i> )	234	247	247	247	247	247	247	247
Superficie total (ha)	34 280	50 777	64 460	79 488	38 721	63 601	70 459	98 379
Volumen utilizado (hm <sup>3</sup> )	687.9	990	1 137.8	1 511.6	687.9	990.0	1 137.8	1 511.6
Beneficio neto <sup>†</sup> (millones de pesos)	209.4	258.2	275.2	307.3	225.5	273.4	291.6	332.4
Beneficio neto <sup>†</sup> (pesos por millar de m <sup>3</sup> )	304.4	260.8	241.9	203.3	327.8	276.2	256.3	219.9

<sup>†</sup> El beneficio neto está expresado en precios y costos del año agrícola 1993-1994.

el volumen excedente menor beneficio del que se podría tener con este mismo volumen en un año seco.

Asimismo, se observa que el tercer escenario planteado (volumen sustentable) es el que proporciona los mayores beneficios sin exceder las condiciones limitantes de recurso agua, por lo que se puede afirmar que la superficie regable, con la cual se aprovechan al máximo los beneficios netos generados por el uso del agua en el distrito es de 64 460 ha, considerando la eficiencia de conducción actual. Al finalizar las obras del PUSACC, con el incremento de la eficiencia de conducción, la superficie regada que maximiza los ingresos de los productores es de 70 459 ha. Este valor es muy similar al obtenido por CNA-IMTA (2005), que estima que la superficie que puede ser regada, de manera segura, año con año con el volumen sustentable, es de 70 630 ha, obtenida mediante un análisis de los requerimientos de riego por cultivo y por módulo de riego, considerando el manejo actual del agua, fases fenológicas, fechas de siembra, láminas aplicadas por cultivo y eficiencias de aplicación.

### CONCLUSIONES

- El modelo de optimización planteado permitió estimar la superficie regable y el patrón de cultivos óptimo para diferentes niveles de disponibilidad de agua que maximizaron los beneficios netos de los productores del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua, de manera que se aprovecharon los recursos disponibles. Aun cuando el modelo de programación lineal fue altamente sensible a la variación de la disponibilidad de agua, los coeficientes de la función objetivo y la eficiencia en la conducción del agua, los resultados obtenidos muestran las alternativas en el manejo de estas variables.
- La superficie sembrada en el distrito donde se utilizaron los volúmenes de agua de riego concesionados y en el cual se aprovecharon al máximo los beneficios netos generados por el uso del agua fue de 70 459 ha.
- La superficie estimada fue inferior en 9643 ha a la superficie regable actualmente (80 102 ha), por lo que es conveniente establecer estrategias para que en el futuro la superficie excedente sea desincorporada

del distrito de riego, o bien, reducir la concesión de agua con la finalidad de lograr la sustentabilidad de los módulos de riego al establecerse sólo las áreas con mejores condiciones y mayor productividad. Asimismo, se recomienda implementar junto con el programa de revestimiento de canales, un programa de mejoramiento de la operación de la red de distribución, de tal manera que se alcance la eficiencia de conducción esperada al finalizar las obras del Programa de Uso Sustentable del Agua en la Cuenca del Conchos (PUSACC).

- Se recomienda la utilización de volúmenes de agua para riego entre 900 y 1100 hm<sup>3</sup>, considerando el agua de presas y pozos profundos en conjunto, y evitar la utilización de volúmenes después de 1100 hm<sup>3</sup>, ya que el beneficio generado comienza a disminuir de manera drástica. Por tal motivo, es útil guardar el volumen excedente para el siguiente año agrícola, con el propósito de que proporcione también una mayor utilidad.

### LITERATURA CITADA

- Bueno, A. G. 1990. Introducción a la programación lineal y análisis de sensibilidad. Trillas. México, D. F.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 1994. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Año Agrícola 1993-1994. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. México, D. F.
- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2002. Uso sustentable del agua superficial del río Conchos. Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. México, D. F.
- CNA-IMTA (Comisión Nacional del Agua-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2005. Formulación del plan director para la modernización integral del riego del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua. Informe Final del Convenio SGIH-RB-CHI-04-MD005-127-RF-AD. CNA-IMTA. México, D. F.
- Cruz-León, J. M. y J. Bielsa-Callau. 2001. Sobre la eficiencia, el uso sostenible del recurso del agua y la gestión del territorio. Ager. Revista de Estudios sobre Despoblación y Desarrollo Rural 1: 85-112.
- DR 005 (Distrito de riego 005 Delicias). 2000. Reglamento del distrito de riego 005 Delicias, Chihuahua. Comité Hidráulico del Distrito. Ciudad Delicias, Chihuahua, México.
- Florencio-Cruz, V., R. Valdivia-Álcala y C. A. Scott. 2002. Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Río Lerma. Agrociencia 36: 483-493.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen. 4ª ed. UNAM. México, D.F.
- Mejía-Saenz, E., E. Palacios-Vélez, A. Exebio-García y A. L. Santos-Hernández. 2002. Problemas operativos en el manejo del agua en distritos de riego. Terra 20: 217-225.
- Palacios-Vélez, E. y A. Exebio-García. 1989. Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.
- SRE (Secretaría de Relaciones Exteriores). 2007. Tratado sobre distribución de aguas internacionales entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América. <http://portal.sre.gob.mx/cilanorte/pdf/TRATAG1944.pdf>. (Consulta: septiembre 18, 2007).
- Velasco-Velasco, I. 1996. Diagnóstico operativo del distrito de riego 005: Delicias, Chihuahua. Ingeniería Hidráulica en México 9: 39-51.