

Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo

Economic value of water in the Alfajayucan (100) district of irrigation, Hidalgo

Domingo Martínez-Luna¹ , José S. Mora-Flores^{1‡} , Adolfo A. Exebio-García¹ ,
Oscar A. Arana-Coronado¹  y Enrique Arjona-Suárez¹ 

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[‡] Autor para correspondencia (saturmf@colpos.mx)

RESUMEN

El agua para consumo humano se distribuye entre los fines que la demandan: doméstico, agropecuario e industrial. De acuerdo a lo reportado por la FAO y UNESCO la agricultura consume 69%, el consumo doméstico utiliza 10% y la industria el 21%. Dada la importancia del agua en la agricultura se requiere conocer la asignación óptima del recurso dado un patrón de cultivos, así como el valor económico del líquido. El objetivo de este trabajo fue el obtener un patrón óptimo de cultivos en el Distrito de Riego (DR) 100 Alfajayucan Hidalgo, así como el de estimar el precio económico del agua ante distintos escenarios. La hipótesis establece que las tarifas pagadas por los agricultores en el DR 100 no reflejan su verdadero valor de escasez. Se instrumentó un modelo de programación lineal para maximizar el ingreso neto de los agricultores con 17 actividades agrícolas cíclicas y perenes, sujetas a 57 restricciones de superficie, agua, mano de obra y maquinaria. Los resultados indican que el ingreso neto del DR 100 se incrementaría en 273 millones de pesos si se establece el patrón óptimo de cultivos, en comparación con el obtenido en el ciclo agrícola 2015-2016. El precio económico del agua arrojado por el modelo fue de \$1.44 m⁻³, muy superior al pagado actualmente por las cuotas de riego (\$0.02 m⁻³), se confirma la existencia de un fuerte subsidio al consumo de agua: por lo que se recomienda se incrementen las cuotas pagadas por los agricultores.

Palabras clave: optimización, precio económico del agua, programación lineal.

SUMMARY

Water for human consumption is supplied for different demanded uses: domestic, agriculture and industry. According to what has been reported by FAO and UNESCO, agriculture consumes 69% of water; domestic purposes consume 10% and industry 21%. Given the importance of water in agriculture and crop pattern, knowledge on the optimal allocation and economic value of the resource is required. The objective of our study was to obtain an optimal crop pattern in the Irrigation District 100 (ID 100) Alfajayucan Hidalgo, as well as to estimate the economical price of water under different scenarios. The hypothesis states that the fees paid by farmers in ID 100 do not reflect their true scarcity value. A linear programming model was implemented to maximize the net income of farmers with 17 cyclical and perennial agricultural activities, subject to 57 surface restrictions, water, labor and machinery. The results indicate that the net income of ID 100 would increase by \$273 million if the optimal crop pattern is established, compared to that obtained in the 2015-2016 agricultural cycle. The economical price of the water according to the model was \$1.44 m⁻³, much higher than that currently paid (irrigation fees = \$0.02 m⁻³), confirming the existence of a strong subsidy to the water supply. Thus, in light our results, the water fees paid by farmers should increase.

Index words: optimization, economic price of water, linear programming.

Cita recomendada:

Martínez-Luna, D., Mora-Flores, J. S., Exebio-García, A. A., Arana-Coronado O. A. y Arjona-Suárez, E. 2021. Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana* 39: 1-12. e544. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.544>

Recibido: 02 de mayo de 2019. Aceptado: 01 de septiembre de 2020.
Artículo. Volumen 39, febrero de 2021.

INTRODUCCIÓN

La República Mexicana recibe anualmente un promedio de 1 449 471 millones de metros cúbicos (Mm^3) de agua en forma de precipitación pluvial, de acuerdo con cálculos de 2015, 72.5% de esa agua se evapotranspiró y regreso a la atmósfera; 21.2% escurrió por ríos y arroyos y el restante 6.3% se infiltró y recargó los acuíferos (CONAGUA, 2016).

De acuerdo con las entradas y salidas de agua, México cuenta al año con 446 777 Mm^3 de agua dulce renovable, la cual al dividirse entre la población proyectada para 2015 se contaba con una disponibilidad per cápita de 3692 $\text{m}^3/\text{habitante/año}$; esa disponibilidad media no permite contemplar los valores regionales, los cuales son de 18 852 $\text{m}^3/\text{habitante}$ en la Frontera Sur; y de 148 $\text{m}^3/\text{habitante}$ en el Valle de México (CONAGUA, 2016). Al estimar la disponibilidad per cápita, es posible conocer la disponibilidad regional a partir de la población de la zona; lo anterior muestra las disparidades regionales que existen en la disponibilidad de agua para las poblaciones de diferentes regiones; y el Valle de México presenta una disponibilidad similar a la región del estado de Hidalgo, sobre todo en la zona árida del Mezquital.

Pronósticos realizados para el año 2030, indican que la sobreexplotación del agua puede conllevar al abatimiento de los niveles freáticos, hundimiento del terreno y causar afectaciones difícilmente reversibles a los ecosistemas y a la sociedad, particularmente, a la población rural que vive en zonas áridas y que depende de manera significativa del agua subterránea (CONAGUA, 2016). Por lo anterior, las decisiones sobre el manejo de los recursos hidráulicos deben tomarse a partir del costo económico o valor del agua, dado que cuando es escasa y cara en relación a los costos de manejo y distribución en los Distritos de Riego DRs (Palacios, V. y G. A. Exebio. 1989).

El porcentaje de agua dulce disponible para el consumo humano se distribuye entre las actividades que la demandan: doméstica, agropecuaria e industrial (Caballer y Guadalajara, 1998). De estos sectores, la agricultura es el que consume más agua, representando globalmente alrededor de 69%, el consumo doméstico alcanza aproximadamente 10% y la industria 21% (FAO, 2002; UNESCO, 2003). A pesar de que la agricultura es el sector que consume más agua en términos de volumen, el uso del líquido es de bajo valor económico,

poco eficiente y subvencionado; estudios realizados a lo largo de los años ochenta revelan que los derechos que se pagan por el riego representan menos del 8 por ciento del valor de los beneficios que la agricultura aporta (Martín de Santa Olalla *et al.*, 2005). Estudiar el agua desde el punto de vista económico permite la toma de decisiones en lo referente a su suministro a los distintos sectores productivos y no productivos. El cálculo del valor económico del líquido implica obtener el valor del producto marginal, es decir, su contribución al valor total de la producción. El beneficio marginal equivale a la cantidad máxima que el usuario estaría dispuesto a pagar por el agua (su disposición al pago), lo que da una medida de su demanda y el valor que se obtendría en una condición de escasez (Garrido *et al.*, 2004)

Los distritos de riego son proyectos hidroagrícola desarrollados por el Gobierno Federal a partir de 1926, con el fin de distribuir el agua para uso agrícola: en México existen 112 Distritos de Riego (DR). Estos distritos buscan modernizar y rehabilitar la infraestructura hidroagrícola para llevar un control en lo referente a la extracción, conducción, distribución y entrega a los usuarios de riego, así como para tecnificar el sistema de riego y, con ello, reducir el consumo de agua parcelario (CONAGUA, 2016).

El Distrito de Riego (DR) 100 Alfajayucan tiene una superficie de 26 016 hectáreas (ha), localizados entre los paralelos 20° 18' y 23° 33' N, entre los meridianos 99° 01' y 99° 17' O y a una altitud promedio de 1950 m. El DR está conformado por tres Unidades de Riego, Chilcuaatla, Alfajayucan e Ixmiquilpan, que abarcan los municipios de Tula, Tezontepec, Mixquiahuala, Tepetitlan, Alfajayucan, Chilcuaatla, Ixmiquilpan, Tasquillo del Estado de Hidalgo (CONAGUA, 2016). Las fuentes de abastecimiento de agua en el DR 100 son las aguas superficiales que escurren en las presas de almacenamiento Endho, Lic. Javier Rojo Gómez, Lic. Vicente Aguirre, y las presas de derivación, Chilcuaatla, Felipe Ángeles, el Maye, El Tecolote, Pallares, Xotho; cuyo volumen útil promedio es de 260 738 mm^3 , en los últimos diez ciclos agrícolas (CONAGUA, 2016).

El DR 100 Alfajayucan presenta un problema sobre cómo establecer tarifas con componentes variables asociados realmente al volumen consumido, ya que aún no se cuenta con sistemas de medición y control del uso predial similar a los que existen en consumo

domiciliario. En los sistemas de irrigación, el agua se maneja mayormente en sectores por turnos en secciones del sistema de riego, y no es factible medir o controlar el agua que ingresa a cada uno de los predios agrícolas del sector. A lo más, la autoridad que distribuye el agua puede medir y controlar el agua que entra a un sector, y en niveles superiores del sistema, pero no al interior de cada predio. Las cuotas en pesos por hectárea por riego son de \$20 sin importar el cultivo (CONAGUA, 2016). Esta situación limita las posibilidades de establecer un plan de tarifas por componentes variables para los agricultores y establecer un esquema que asocie el valor real del agua a la extensión de tierra regada, poseída o sembrada por los agricultores, y en este último caso, puede haber un pago contrastado entre cultivos si hay mucha diferencia en la intensidad en el consumo de agua. Así, el esquema de tarifas en el sector de riego tiene una relación indirecta con el consumo de agua de los agricultores, en la medida en que este se asocia, más o menos proporcionalmente a la extensión de tierras y de los cultivos instalados (CONAGUA, 2016). El objetivo de este trabajo es optimizar el patrón de cultivos en el DR 100, ubicado en Alfajayucan, estado de Hidalgo, mediante un modelo de programación lineal, y calcular el valor económico del agua mediante diferentes escenarios de escasez, de acuerdo con el patrón de cultivos de los ciclos agrícolas de diez años (2005-2015). La hipótesis de la investigación es que las tarifas actuales pagadas por los agricultores en el DR100 no reflejan su verdadero valor de escasez del agua de riego.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó con información del Distrito de Riego 100 (DR100) Alfajayucan, Hidalgo. El Distrito de Riego se creó oficialmente mediante un acuerdo con fecha 17 de enero de 1976, publicado en el Diario Oficial de la Federación.

Algunos autores (Florencio *et al.*, 2002; Godínez *et al.*, 2007; Ortega, 2013) indican que el uso de un modelo de programación lineal es un medio adecuado para obtener el valor económico del agua. Los modelos de programación permiten calcular funciones de demanda de agua mediante relaciones matemáticas, asumen que el agricultor busca maximizar los beneficios de su explotación teniendo en cuenta una serie de restricciones como agua, tierra, maquinaria y mano de obra (Varela-Ortega *et al.*, 1998).

Un enfoque de valoración del agua sería el de los precios hedónicos, esto es a satisfacción, como un método de valoración indirecta. Determina de qué manera el uso de un recurso el agua, influye en el precio de un mercado bien definido como el precio de la tierra y, está basado en comparaciones entre cultivos de regadío con precios de fincas de regadío de similares características, de forma que al calcular la diferencia se puede obtener el valor del agua (Young, 2005).

Una respuesta completa del método simplex consta de cuatro partes: a) el valor de la función objetivo, que indica la máxima ganancia o mínimo costo; b) la base solución, que indica las actividades que se deben llevar a cabo para cumplir con la función objetivo especificada (pueden aparecer recursos no utilizados en el resultado); c) reducción en el valor de la función objetivo por la incorporación forzosa en la base de la solución de una actividad no considerada inicialmente; d) reducción en el valor de la función objetivo por restricciones en los recursos, es decir, valor que se pierde en la función objetivo por disponer de una unidad menos de recurso restrictivo (Hurtado-Huamán, 1994).

El modelo de programación lineal con el que se desarrolló este trabajo tiene como objetivo maximizar el ingreso neto total (valor bruto de la producción por unidad menos los costos de producción de esa unidad) de los productores del DR100, sujeto a restricciones de superficie, disponibilidad de agua, mano de obra, maquinaria y de superficie máxima y mínima sembrada de los cultivos.

Los datos que se utilizaron en los modelos de programación lineal se obtuvieron de dos fuentes: a) la primera consistió en la revisión de documentos y bases de datos generados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), el Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA) y; b) la segunda fuente se obtuvo de entrevistas a los productores de los diferentes cultivos que se consideraron en el modelo. Es pertinente señalar que el análisis de programación lineal es un estudio de corte transversal, que utiliza información de fuentes secundarias para un año específico, en este caso 2015-2016, la información de campo obtenida de los productores fue sólo para complementar la primera; por lo mismo, no es un modelo probabilístico cuya información se obtenga por muestreo.

El modelo abarcó 17 actividades (Cuadro 1), y 57 restricciones a saber: superficie disponible mensualmente, 12; requerimiento unitario de riego mensual para los cultivos en el año agrícola, 12; suma de volumen de agua requerido anualmente, 1; maquinaria requerida por los cultivos de manera mensual en el año agrícola, 12; superficie (ha) máxima y mínima sembrada por cultivo en el ciclo agrícola, 17. El modelo de referencia o base MPL00 se construyó con actividades y restricciones en el cual se optimiza el patrón de cultivos, durante el año agrícola 2015-2016.

El modelo está compuesto por i (1, 2, ..., I) actividades producidas en el ciclo Otoño-Invierno (O-I), j (1, 2, ..., J) para el ciclo Primavera-Verano (P-V) y k (1, 2, ..., K) para cultivos perennes. La función objetivo optimiza el ingreso neto total de los productores del DR100. Con la metodología de Programación lineal (Hillier y Liberman, 1997) el modelo matemático se establece de la siguiente manera:

Cuadro 1. Siembra y cosecha de cultivos agrícolas objeto de estudio para la estimación del Modelo de Programación Lineal. Table 1. Sowing and harvesting of agricultural crops under study for the estimation of the Linear Programming Model.

Ciclo	Actividades
Otoño-Invierno	Avena forrajera (<i>Avena sativa</i>)
	Cebada (<i>Hordeum vulgare</i>)
	Coliflor (<i>Brassica oleracea</i> L.)
	Haba (<i>Vicia faba</i>)
	Trigo grano (<i>Triticum</i>)
	Otros cultivos
Primavera-Verano	Calabacita (<i>Cucurbita pepo</i>)
	Chile (<i>Capsicum annuum</i>)
	Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i>)
	Coliflor (<i>Brassica oleracea</i> L.)
	Siembra y cosecha maíz (<i>Zea mays</i>)
	Jitomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)
Perennes	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)
	Otros cultivos
	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
	Frutales asociados
	Otros pastos

$$Max INT = \sum_{i=1}^I c_i x_i + \sum_{j=1}^J c_j x_j + \sum_{k=1}^K c_k x_k \quad (1)$$

La función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^I a_i x_i + \sum_{j=1}^J a_j x_j + \sum_{k=1}^K a_k x_k \leq S_t \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I b_i x_i + \sum_{j=1}^J b_j x_j + \sum_{k=1}^K b_k x_k \leq V_t \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^I d_i x_i + \sum_{j=1}^J d_j x_j + \sum_{k=1}^K d_k x_k \leq MO_t \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I e_i x_i + \sum_{j=1}^J e_j x_j + \sum_{k=1}^K e_k x_k \leq MQ_t \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I a_i x_i \leq S_{O-I} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j x_j \leq S_{P-V} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k \leq S_{PER} \quad (8)$$

$$x_i, x_j, x_k \geq 0 \quad (9)$$

Donde la función objetivo (Ecuación 1) maximiza el ingreso neto total del DR100, optimizando las actividades i , j y k ; donde c_i , c_j , c_k representan el ingreso neto de los cultivos y x_i , x_j , x_k la superficie (ha) óptima para cada cultivo.

Las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 simbolizan las restricciones de superficie, agua, mano de obra y maquinaria demandadas de manera unitaria por cada actividad; S_t , V_t , MO_t , MQ_t indica la disponibilidad mensual de superficie, volumen de agua, mano de obra y maquinaria; a_i , b_i , d_i , e_i representan coeficientes de superficie, requerimiento de riego, coeficientes de

mano de obra y maquinaria para el ciclo OI; a_j, b_j, d_j, e_j , son coeficientes de superficie, requerimiento de riego, coeficientes de mano de obra y maquinaria para el ciclo PV; a_k, b_k, d_k, e_k , simbolizan coeficientes de superficie, requerimiento de riego, coeficientes de mano de obra y maquinaria para el ciclo perennes.

Las ecuaciones 6, 7, y 8 constituyen la superficie máxima y mínima permitida por sembrar en los ciclos OI, PV y perennes; $S_{O-P}, S_{P-V}, S_{PER}$, es el límite de superficie sembrada para cada cultivo, en cada ciclo O-I, P-V y perennes.

Los cultivos que conformaron el modelo se seleccionaron a partir del patrón histórico de cultivos de los últimos 10 años agrícolas reportados por el DR 100, los cuales son para el ciclo O-I (avena, cebada, coliflor, haba, trigo, otros cultivos), para el ciclo P-V (calabacita, chile, frijol, coliflor, maíz, jitomate, tomate, otros cultivos) y cultivos perennes (alfalfa, frutales y otros pastos).

El beneficio neto para cada cultivo se obtuvo como la diferencia entre el ingreso bruto menos los costos de producción, con precios para el año 2015 (CONAGUA, 2016). Los coeficientes técnicos de tierra, agua, mano de obra y maquinaria se obtuvieron de los datos registrados en instituciones agropecuarias como SAGARPA y CONAGUA. Las restricciones de máximos y mínimos se establecieron con base en el patrón histórico de cultivos de diez años, según la información recabada en el DR100. La disponibilidad de agua es el volumen bruto extraído (mm^3) y consumido por mes en el año agrícola 2015-2016, de

acuerdo con las estadísticas del DR, como se muestra en la Figura 1.

Con base en la información recabada se establece el análisis del ciclo agrícola 2015-2016 del DR100, Alfajayucan. Partiendo de esta información se construye el Modelo Base (MPL00 Base), a partir de este modelo, se derivan 7 escenarios: MPL01, reducción del 25% de la disponibilidad de volumen de agua; MPL02, reducción del 50% de la disponibilidad de volumen de agua; MPL03, reducción del 75% de la disponibilidad de volumen de agua; MPL04, disponibilidad uniforme de agua todos los meses del año ($41\,666.6\text{ Mm}^3$); MPL05, disminución del 20% en la superficie y 20% en la disponibilidad de agua, simulando un crecimiento poblacional y una disminución de la superficie agrícola; MPL06, modelo sin restricciones de máximo y mínimo para la superficie de los cultivos perennes; MPL07, elimina las restricciones de máximos y mínimos por cultivo, permitiendo que el modelo asigne la superficie con base en el ingreso neto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de la metodología utilizada, los resultados hacen referencia al análisis del modelo de optimización y modelo de simulación, productividad del agua.

Modelo Base contra Situación Actual

El modelo de programación lineal se estimó con información del ciclo agrícola 2015-2016, el cual

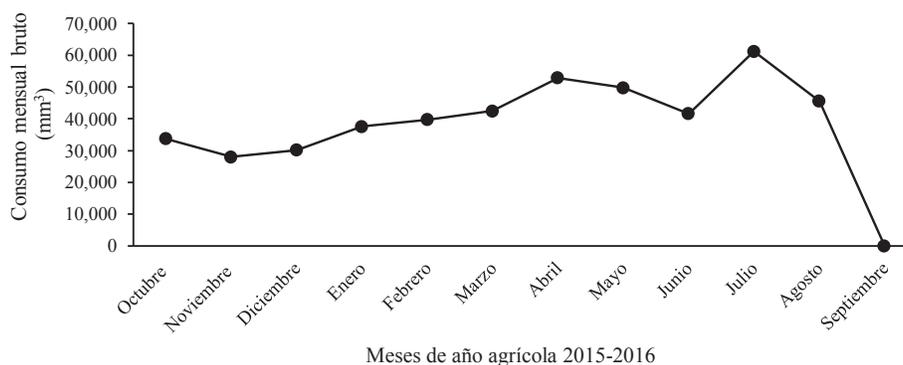


Figura 1. Consumo de agua por mes en el ciclo agrícola 2015-2016 (Mm^3). Fuente: Elaborado con información de la jefatura del Distrito de Riego 100, Alfajayucan (CONAGUA, 2018).

Figure 1. Water consumption per month in the 2015-2016 agricultural cycle (Mm^3). Source: Prepared with information from the headquarters of the Irrigation District 100, Alfajayucan (CONAGUA, 2018).

consiste en determinar el patrón óptimo de cultivos que se deberían sembrar en el DR 100, Alfajayucan, haciendo que se obtenga el mayor ingreso posible con base en la disponibilidad de recursos (tierra, agua, mano de obra y maquinaria).

Utilizando los precios del año agrícola 2015-2016 el modelo de programación lineal estimo el patrón óptimo de cultivos, en el cual los productores obtienen un ingreso máximo de \$1213 millones. Teniendo en cuenta el patrón de cultivos del año agrícola los productores obtuvieron en 2016, un ingreso total de \$939.741 millones; es así que los productores dejaron de percibir \$273.441 millones (22% menos de su ingreso) al no aplicar de manera óptima la producción. Los resultados anteriores concuerdan con los reportados por Ortega (2013) para el DR 005, Delicias, Chihuahua, en donde con una asignación óptima de los recursos en

los cultivos se obtiene un ingreso de la optimización de los cultivos \$16.10 millones. Los resultados anteriores concuerdan con los obtenidos por Godínez *et al.* (2007), donde el ingreso de los productores en la Comarca Lagunera se incrementó en un 17% con la asignación óptima, versus el escenario real. De igual forma, Zetina *et al.* (2013), encontraron en el DR 044 en Jilotepec Estado de México, que el ingreso con el modelo óptimo se incrementaría en 25% en relación a la situación real.

En el año agrícola 2015-2016 en el ciclo O-I se sembraron 1312 ha de avena forrajera, 35 ha de cebada, 840 ha de coliflor, 118 ha de haba, 215 ha de trigo. En contraste, el modelo de programación lineal indica que se debe sembrar 993 ha de avena, 35 ha de cebada, incrementar a 1329 ha de coliflor, 118 ha de haba, disminuir a 155 ha de trigo (Cuadro 2). Lo anterior

Cuadro 2. Comparación del patrón actual de cultivos, ciclo agrícola 2015-2016 con el patrón óptimo de cultivos del modelo base MPL00.
Table 2. Comparison of the current crop pattern, 2015-2016 agricultural cycle with the optimal crop pattern of the MPL00 base model.

Cultivo	Año agrícola 2015-2016		Patrón óptimo	
	ha	%	ha	%
Ciclo: Otoño-Invierno				
Avena forrajera	1312	4.53	993	3.57
Cebada forrajera	35	0.12	35	0.13
Coliflor	840	2.9	1329	4.77
Haba	118	0.41	118	0.42
Trigo grano	215	0.74	155	0.56
Otros cultivos	63	0.22	0	0.00
Ciclo: Primavera-Verano				
Calabacita (calabacín)	331	1.14	1415	5.08
Chile	834	2.88	1486	5.34
Frijol (alubia)	271	0.93	208	0.75
Coliflor	1208	4.17	1868	6.71
Maíz grano	9551	32.95	7750	27.83
Jitomate (tomate rojo)	5	0.02	42	0.15
Tomate de cáscara (tomatillo)	412	1.42	916	3.29
Otros cultivos	62	0.21	0.00	0.00
Cultivos Perennes				
Alfalfa	13 468	46.46	11147	40.03
Frutales asociados	186	0.64	313	1.12
Otros pastos	74	0.26	74	0.27
Total	28 985	100	27 849	100

Fuente: Elaboración propia en base a los resultados del modelo base.

Source: Own elaboration based on the results of the base model.

muestra como la asignación óptima preferencia los cultivos de mayor densidad económica (de acuerdo con el ingreso neto), como las hortalizas (coliflor) y disminuye aquellos de menor ingreso neto como la avena y el trigo. Los resultados anteriores concuerdan con los obtenidos por Zetina *et al.* (2013) en el DR 044 de Jilotepec Estado de México donde el plan óptimo incrementa sustancialmente la superficie de avena forrajera y frutales, y disminuye la superficie destinada a un cultivo básico como maíz, de menor densidad económica. De igual forma, Godínez *et al.* (2007), en la Comarca Lagunera constató que el plan óptimo disminuyó la superficie cultivada con avena.

En el año agrícola 2015-2016 con el patrón óptimo de cultivos, para el ciclo P-V, se incrementan 1084 ha de calabacita, 652 ha de chile, 660 ha de coliflor, 37 ha de jitomate, 506 ha de tomate. Los cultivos que disminuyen la superficie sembrada son frijol con 63 ha y maíz con 1800 ha (Cuadro 2). Los cultivos de los que se obtiene mayor ingreso neto en el ciclo PV son coliflor que aporta 53%, maíz aporta 21.08% y chile 16%.

En el año agrícola 2015-2016 el modelo óptimo disminuyó la superficie de alfalfa en 2320 ha e incrementó en 127 ha los frutales, contrario a la situación real; lo anterior muestra como las asignaciones óptimas favorecen a los cultivos de mayor ingreso neto, contrario a los de menor densidad económica, como la alfalfa, la cual, incluso, consume mayor cantidad de agua. Los resultados anteriores concuerdan con los obtenidos por Godínez *et al.* (2007), de la Comarca Lagunera aseveraron que el modelo óptimo disminuyó la siembra de alfalfa, como consecuencia de su baja rentabilidad y su mayor demanda de agua.

Uso de los Recursos en el Modelo de Programación Lineal Base (MPL00)

Las restricciones de recursos a las cuales se encuentra sujeta la función objetivo son superficie, agua, mano de obra y maquinaria. Los resultados que se obtienen del modelo de programación lineal base indican para superficie lo siguiente: los meses con menos ha sembradas fueron septiembre y febrero con 11 534 y 11 842, respectivamente. El mes con mayor superficie sembrada fue abril con 25 409 hectáreas.

En cuanto a volumen de agua mensual utilizado por los cultivos en septiembre no se presentan riegos

debido a la época de lluvias; la mayor de manda de agua se da en abril y mayo 51 754 y 68 441 Mm³, respectivamente.

La mano de obra es un recurso abundante, el cual no se agota; el mes con menor demanda es septiembre con 1870 jornales, esto se debe a que en ese mes se tiene la menor superficie sembrada. El mes de mayor demanda de jornales es abril con 13 132; esta es la razón del inicio del ciclo P-V, en el cual se deben realizar las labores de cultivo iniciales.

Por otro lado, durante mayo, junio, julio y diciembre no se utiliza maquinaria, debido a que en estos meses no hay labores culturales previas a la siembra. En contraste, en marzo se utiliza la mayor cantidad de tractores debido a las labores culturales que se realizan a inicio del ciclo P-V.

Escenarios Construidos a Partir del Modelo Base MPL00

Una vez establecido el modelo de programación lineal base MPL00 se establecieron escenarios en los cuales la función objetivo utiliza los precios correspondientes a 2015, y se obtuvieron los siguientes resultados:

Escenario MPL01, reducción del 25% de la disponibilidad de volumen de agua anual: el ingreso neto disminuye en 16% (Cuadro 4), la superficie sembrada disminuye en 33%, la disponibilidad de agua es un recurso que se agota, la cual presenta en pesos un precio sombra de 2.15 \$/m³ (Cuadro 5). En cuanto a mano de obra y maquinaria, son recursos que no se agotan, dadas las restricciones impuestas en el modelo. Los cultivos seleccionados en comparación con el modelo base, se deja de producir maíz debido a la alta demanda de agua y a la baja rentabilidad del cultivo (Cuadro 3).

Escenario MPL02, reducción del volumen disponible de agua en 50%, en comparación con el modelo base MPL00: el ingreso disminuye en 16% (Cuadro 4), la superficie sembrada se reduce en 43%, la disponibilidad de agua se manifiesta como un recurso escaso, teniendo un precio sombra de 2.11 \$/m³ (Cuadro 5), mano de obra incrementa la demanda en 8% y el uso de maquinaria disminuye en 43% (gráfica 5.7 y 5.8). Debido a la alta demanda de agua, la alfalfa no es un cultivo seleccionado por el modelo ante este escenario (Cuadro 3).

Cuadro 3. Superficies sembradas para cada escenario (ha).
Table 3. Sown areas for each scenario (ha).

Cultivos	Ciclo agrícola 2015-2016	Escenarios							
		MPL00	MPL01	MPL02	MPL03	MPL04	MPL05	MPL06	MPL07
Ciclo: Otoño Invierno									
Avena	1312	993	993	993	993	993	993	993	0
Cebada	35	35	35	35	35	87	35	35	0
Coliflor O-I	840	1329	1329	1329	1329	673	184	1329	10 498
Haba	118	118	118	118	118	118	118	118	1 706
Trigo Grano	215	155	155	155	155	155	155	155	0
Otros Cultivos O-I	63	0	0	0	0	0	0	0	0
Ciclo: Primavera Verano									
Calabacita	331	1415	331	1116	331	331	331	331	0
Chile	834	1486	1486	1486	885	542	542	542	0
Frijol	271	208	208	208	208	208	208	208	0
Coliflor P-V	1208	1 868	1868	1868	1868	1868	828	1868	11 423
Maíz grano	9 551	7750	0	7231	0	0	7231	7231	0
Jitomate	5	42	5	5	5	5	5	5	0
Tomate	412	916	564	916	412	412	412	412	0
Otros cultivos P-V	62	0	0	0	0	0	0	0	0
Cultivos perenes									
Alfalfa	13 468	11 147	11 147	0	0	11 147	11 147	0	0
Frutales asociados	186	313	313	313	313	184	184	10 462	0
Otros pastos	74	74	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	28 985	27 849	18 552	15 773	6652	16 723	22 373	23 689	23 627

Fuente: Elaborado con la información de las salidas de los MPL en Excel (2018).
 Source: Prepared with the information of the MPL outputs in Excel (2018).

Escenario MPL03, disminución en el volumen de agua en 75% de acuerdo con el modelo base (MBPL00): el ingreso disminuye en 34% (Cuadro 4), solo se permite sembrar 6652 ha de las 27 849 ha sembradas en el MPL00. Se agota el volumen de agua, el precio sombra es de 4.20 \$/m³ (Cuadro 5), la mano de obra y la maquinaria se presentan como recursos disponibles. Debido a la poca disponibilidad de agua el modelo no selecciona a los cultivos con alta demanda de agua (maíz y alfalfa) (Cuadro 3). Los resultados anteriores coinciden con los obtenidos por Zetina *et al.* (2013), los cuales, en el DR 044 de Jilotepec Estado de México, donde al haber una mayor escasez de agua, se da una reconversión productiva hacia cultivos de mayor densidad económica como frutales y trigo.

De la misma forma, Ortega (2013), para el DR005 en Delicias Chihuahua constató que al disminuir el volumen de agua se dejan de sembrar cultivos menos rentables y de mayor consumo del líquido: como la alfalfa.

Escenario MPL04, disponibilidad uniforme de agua todos los meses del año (41 666 Mm³) en comparación con MPL00: el ingreso disminuye 36% (Cuadro 4), la superficie sembrada es de 16 723 ha. La disponibilidad de agua se establece como un recurso escaso, dado que en mayo se demanda la mayor cantidad de agua. El precio sombra del agua en pesos es de 40.85 \$/m³ (Cuadro 5). La mano de obra y maquinaria son recursos disponibles. Dado que la disponibilidad de agua es uniforme de manera mensual, hay meses en los que

Cuadro 4. Resultados obtenidos en el Modelo de Programación Lineal para el año 2015.
Table 4. Results obtained in the Linear Programming Model for the year 2015.

Modelo	Escenarios							
	MPL00	MPL01	MPL02	MPL03	MPL04	MPL05	MPL06	MPL07
Disponibilidad de agua (M m ³)	500 000	375 000	250 000	125 000	41 667	400 000	500 000	500 000
Ingreso neto (mill. de pesos)	1213	1020	1025	804	781	608	2245	4660
Variación (%) con el MPL00		-16	-16	-34	-36	-50	85	284
Superficie sembrada (Ha)	27 849	18 552	15 773	6652	16 723	22 373	23 689	23 627
Variación (%) con el MPL00		-33	-43	-76	-40	-20	-15	-15
Consumo de agua (M m ³)	500 000	375 000	250 000	125 000	332 330	400 000	500 000	500 000
Variación (%) con el MPL00		-25	-50	-75	-34	-20	0	0
Mano de obra (Mhr jornal)	15	12	8	4	11	12	13	17
Variación (%) con el MPL00		-21	-50	-72	-30	-23	-16	12
Maquinaria (Khr-maq)	424	288	243	109	260	338	357	354
Variación (%) con el MPL00		-32	-43	-74	-39	-20	-16	-16

Fuente: Elaborado con la información de las salidas de los MPL en Excel (2018).
 Source: Prepared with the information of the MPL outputs in Excel (2018).

la demanda de agua es mayor que en otros, dando como resultado un decremento de 673 ha para el cultivo coliflor O-I; el maíz no es un cultivo seleccionado por el modelo, debido a la alta demanda de agua y la baja rentabilidad, dado que la función objetivo maximiza el ingreso neto, y ante este escenario hay actividades que se dejan de producir, lo anterior denota que ya no son rentables (Cuadro 3).

Escenario MPL05, disminución del 20% en la superficie y 20% en la disponibilidad de agua, simulando un crecimiento poblacional y una reducción de la superficie agrícola y comparándolo con el MPL00: el ingreso disminuye en 50% (Cuadro 4), la superficie sembrada se reduce a 23 689 ha, el volumen de agua es un recurso que se agota, arrojando en pesos un precio sombra de 13.72 \$/m³ (Cuadro 5). La mano de obra y maquinaria son recursos que no se agotan. Disminuye de 1329 a 184 ha la producción de coliflor O-I, la producción de chile reduce la superficie sembrada de 1486 a 542 ha y la calabaza disminuye su área sembrada de 1415 a 331 ha (Cuadro 3).

Escenario MPL06, sin restricciones de máximo y mínimo para la superficie de cultivos perenes en contraste con el MPL00: el ingreso se incrementa en 85% (Cuadro 4), se asigna una superficie sembrada de 23 689 ha, el agua es un recurso que se agota, teniendo

un precio en sombra de pesos 4.69 \$/m³ (Cuadro 5). La maquinaria y mano de obra son recursos que no se agotan. La siembra de cultivos que se modifican durante P-V ante este escenario son: calabacita disminuye de 1 415 a 331 ha, chile reduce de 1486 a 542 ha y tomate de 916 a 412 ha. Al quitar la restricción de los cultivos perenes la producción de alfalfa no es un cultivo seleccionado debido a su alta demanda de agua y baja rentabilidad. En este escenario se genera un incremento en el ingreso, pero en la comunidad es necesaria la producción de alfalfa, debido a la alta demanda (Cuadro 3).

Escenario MPL07, se elimina las restricciones de máximos y mínimos por cultivo, permitiendo que el modelo asigne la superficie con base en el ingreso neto: el ingreso se incrementa 4660 millones de pesos (Cuadro 4). Se siembran 23 687 ha. El volumen de agua es un recurso que se agota, dando en pesos un precio sombra de 0.11 \$/m³ (Cuadro 5). La maquinaria y mano de obra son recursos disponibles. Al no presentarse restricciones en cuanto a la superficie sembrada máxima y mínima, el modelo seleccionó los cultivos más rentables y con menos demanda de agua, para el ciclo otoño-invierno, seleccionó 10 498 ha de coliflor y 1706 ha de haba para O-I y, para P-V eligió 11 423 ha de coliflor (Cuadro 3).

Cuadro 5. Valor del precio sombra del agua de riego para cada escenario.
Table 5. Value of the shadow price of irrigation water for each scenario.

Modelo	Escenarios (MPL)							
	00	01	02	03	04	05	06	07
Superficie sembrada	27 849	18 552	15 773	6652	16 723	22 373	23 689	23 627
Disponibilidad de agua	500 000	375 000	250 000	125 000	41 667	400 000	250 000	500 000
Precio sombra	1.44	2.15	2.11	4.2	40.85	13.72	4.69	0.11

Superficie sembrada se expresa en ha, la disponibilidad de agua en Mm³, y el precio sombra en pesos \$/m³. Fuente: Elaborado con la información de las salidas de los MPL en Excel (2018).

Sown area is expressed in ha, water availability in Mm³, and shadow price in pesos \$/m³. Source: Prepared with the information from the MPL outputs in Excel (2018).

Los resultados concuerdan con los encontrados por Zetina *et al.* (2013), cuyo modelo cuando se quitan las restricciones de superficies máximas a asignar, el maíz es excluido del plan de producción, debido a que aporta un ingreso neto menor al productor. En el mismo sentido, Florencio *et al.* (2002), indican que, ante una reducción en la disponibilidad de agua, los cultivos con baja rentabilidad y alto consumo de agua reducirán su superficie cultivada.

Precio Sombra del Agua

El precio sombra es aquel que refleja la escasez de los resultados tomando en cuenta el equilibrio de las fuerzas de oferta y demanda en un mercado competitivo; es llamado también precio social, precio económico y precio que refleja el costo de oportunidad (Hurtado-Huamán, 1994).

El precio sombra representa el valor en que se incrementaría el ingreso neto si se dispusiera de una unidad adicional de agua, siempre y cuando se lleva a cabo el patrón de cultivos propuesto por el modelo. El precio sombra del agua toma el valor de cero cuando este no se emplea en toda su disponibilidad, es decir, el agua para riego sobrante habrá de considerarse como una mercancía abundante.

En el Cuadro 5 se presentan los precios sombra del agua de riego para los escenarios establecidos, estos simbolizan el precio máximo que los agricultores estarían dispuestos a pagar por cada m³ adicional de agua en un año agrícola. Estos precios varían de 0.11 a 40.11 \$/m³ en los distintos escenarios.

En el DR Alfajayucan, las cuotas de riego promedio y el precio que los usuarios pagan por el agua del sector

agrícola, según fuente por CONAGUA (2015) fueron de \$0.02/m³. Al comparar el precio sombra del agua para riego que se obtuvo 1.44 \$/m³ (máxima disposición a pagar por parte de los productores agrícolas por tener una unidad de agua adicional de agua en el proceso productivo) con la cuota por la conservación y mantenimiento de los canales, se observa que el valor económico del agua es 72 veces mayor. Al comparar estas evidencias, en el DR 100, los usuarios, pagan cuotas que no reflejan su verdadero valor de escasez (valor económico), ya que pueden pagar más por cada unidad adicional del recurso, hasta el valor del precio sombra.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de programación lineal, los recursos productivos (tierra, agua, mano de obra y maquinaria) están subutilizados en el DR100 de Alfalayucan, Hidalgo. Una asignación óptima incrementaría en un 22% el ingreso de los productores, al aumentar la superficie sembrada con hortalizas (calabacita coliflor y brócoli), y disminuiría la siembra de cultivos básicos o forrajeros (maíz y alfalfa).

Con la eliminación de las restricciones de máximos y mínimos para cultivos que se introducen en el modelo como necesarios a producir, el ingreso del productor se incrementa sustancialmente en más del 400%; y los cultivos que se eligen son los más rentables como coliflor y haba, y se eliminan cultivos menos rentables y con mayor consumo de agua como maíz y alfalfa.

Los precios económicos del agua estimados por su valor marginal (\$1.44/m³) son sustancialmente mayores a los efectivamente pagados por la cuota de

riego (\$0.02 /m³), por lo que se confirman los subsidios que reciben los productores vía el pago del agua. Por lo que se recomienda incrementar paulatinamente las cuotas, lo que redundaría en mayor disponibilidad de recursos para dar mantenimiento a la infraestructura de riego.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles con el principal autor del trabajo (Domingo Martínez Luna), a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

La investigación reportada fue financiada con los recursos de investigación que el Colegio de Postgraduados les asigna a sus estudiantes de Maestría.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Desarrolló la parte sustantiva de la investigación referente a la metodología, consecución de la información y estimación de los modelos: D.M.L. Dirigió la investigación y la estructura del trabajo, así como la redacción y las correcciones del mismo: J.S.M.F. Apoyó en la definición del problema, así como en la canalización al área de estudio y la consecución de la información: A.A.E.G. Ayudó en el manejo teórico de la metodología: O.A.A.C. Apoyó en los aspectos teóricos y matemáticos de la metodología: E.A.S.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Jefe del Distrito de Riego 100 de Alfajayucan, así como al personal técnico del mismo, por el apoyo otorgado para la consecución de la información con la que se elaboró el trabajo.

LITERATURA CITADA

- World Bank. 2005. Shaping the future of water for agriculture: A sourcebook for investment in agricultural water management. Agriculture and Rural Development. World Bank[®] Washington, DC, USA. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/7298> License: CC BY 3.0 IGO. (Consulta: abril 21, 2019).
- Caballer-Mellado, V. y N. Guadalajara-Olmeda. 1998. Valoración económica del agua de riego. Mundi-Prensa. España. ISBN: 9788471147295.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. 2013-2014. CONAGUA. México, D. F.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2016. Atlas del Agua en México. CONAGUA. México, D. F.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2002. Agua y cultivos: logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. <http://www.fao.org/docrep/005/Y3918S/y3918s.htm>. FAO. Roma, Italia. (Consulta: abril 21, 2019).
- Florencio Cruz, V., R. Valdivia Alcalá y C. A. Scott. 2002. Productividad del agua en el distrito de riego 011, Alto Río Lerma. *Agrociencia* 36: 483-493.
- Garrido, C. A., E. Palacios V., J. Calatrava L., J. Chávez M. y A. Exebio G. 2004. La importancia del valor, costo y precios de los recursos hídricos en su gestión. Proyecto Regional de Cooperación Técnica para la formación de Economía y Políticas Agrarias y de Desarrollo Rural en América Latina. FODEPAL. Colaboración de Universidad Politécnica de Madrid – Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas - Universidad Politécnica de Cartagena. Madrid, España.
- Godínez-Montoya, L., J. A. García-Salazar, M. Fortis-Hernández, J. S. Mora-Flores, M. Á. Martínez-Damián, R. Valdivia-Alcalá y J. Hernández-Martínez. 2007. Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana* 25: 51-59.
- Hillier, F. S. y G. J. Lieberman. 1997. Introducción a la investigación de operaciones. Mc Graw-Hill Interamericana Editores S.A. de C.V. México, D. F.
- Hurtado-Huamán, F. 1994. Programación lineal multiobjetivo aplicado a sistemas campesinos: simulación de efectos medioambientales. Instituto de Investigación Universidad y Región. Cusco, Perú.
- Martín de Santa Olalla M., F., P. López F. y A. Calera B. 2005. Agua y agronomía. Mundi-Prensa. España.

-
-
- Ortega-Gaucin, D. 2013. Factores socioculturales que limitan la gestión y el uso sustentable del agua: el caso del Distrito de Riego 005 Delicias, Chihuahua. *Art. Ensayos Sociol. Rural* 8: 7-19.
- Palacios, V. y G. A. Exebio. 1989. *Introducción a la teoría de la operación de Distritos y Sistemas de Riego*. Colegio de Postgraduados, Centro de Hidrociencias. Montecillo, Edo. de México, México. ISBN: 9688390828.
- UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación y la Cultura). 2003. *Agua para todos, agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. UNESCO. <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001295/129556s.pdf>. Washington, DC, USA. (Consulta: abril 21, 2019).
- Varela-Ortega, C., J. M. Sumpsi, A. Garrido, M. Blanco, and E. Iglesias. 1998. Water pricing policies, public decision making and farmer's response: Implications for water policy. *Agric. Econ.* 19: 193-202. doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-5150\(98\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0169-5150(98)00048-6).
- Young, R. A. 2005. *Determining the economic value of water: Concepts and methods*. Routledge. Washington, DC, USA. ISBN: 1-891853-98-8.
- Zetina-Espinosa, A. M., J. S. Mora-Flores, M. Á. Martínez-Damián, J. Cruz-Jiménez, y R. Téllez-Delgado. 2013. Valor económico del agua en el Distrito de Riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agric. Soc. Desarr.* 10: 139-156.