

DOI: 10.24850/j-tyca-2025-01-04

Artículos

**Valor económico del agua en el Distrito de Riego 003
Tula, Hidalgo, México**

**Economic value of water in Irrigation District 003 Tula,
Hidalgo, Mexico**

Jonathan Hernández-Pérez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8892-8115>

Oscar A. Arana-Coronado², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5720-7561>

Juan Hernández-Ortiz³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5957-594X>

Ramón Valdivia-Alcalá⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0434-3169>

¹Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México,
jonahdezp@gmail.com

²Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México, México,
aranaosc@colpos.mx

³Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México,
jhdzo@yahoo.com.mx

⁴Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México,
ramvaldi@gmail.com

Autor para correspondencia: Oscar A. Arana-Coronado,
aranaosc@colpos.mx

Resumen

Ante el incremento en la demanda de agua para riego en los últimos años, se necesitan tomar medidas de política que contribuyan al uso y asignación eficiente del recurso agua en la agricultura. El objetivo de la presente investigación fue determinar el valor económico del agua en el distrito de riego 003 Tula, Hidalgo, en diferentes escenarios de escasez de acuerdo con el patrón de cultivos del año agrícola 2020-2021. Se utilizó un modelo de programación lineal y se resolvió con el método Simplex con la herramienta de análisis Solver® de Microsoft Office Excel®. Al reducir la disponibilidad de agua en el DR003 Tula del 100 al 50 %, el precio sombra pasa de 0.64 a 0.91 \$/m³ de agua, se reduce la superficie sembrada total en 50.2 % y la superficie de cebada forrajera, rye grass, avena forrajera y bermuda.

Palabras clave: valoración económica, precios sombra, agua residual, programación lineal, escasez.

Abstract

Given the increase in the demand for irrigation water in recent years, it is necessary to take policy measures that contribute to the efficient use and allocation of water resources in agriculture. The objective of this research was to determine the economic value of water in the irrigation district 003 Tula, Hidalgo, in different scarcity scenarios according to the crop pattern

of the 2020-2021 agricultural year. A linear programming model was used and it was solved with the Simplex method with the Solver® analysis tool from Microsoft Office Excel®. By reducing the availability of water in the DR003 Tula from 100 to 50 %, the shadow price goes from 0.64 to 0.91 \$/m³ of water, the total planted area is reduced by 50.2 % and the area of feed barley, rye grass, forage oats and Bermuda.

Keywords: Economic valuation, shadow prices, wastewater, linear programming, scarcity.

Recibido: 27/03/2023

Aceptado: 15/09/2023

Publicado Online: 27/09/2023

Introducción

La contaminación del agua es un efecto combinado de procesos físicos, químicos y biológicos a lo largo de las vías hidrológicas sobre, debajo y a través de la tierra. Estos impactos en la calidad del agua reducen la disponibilidad del agua en las regiones (De Anda & Shear, 2021). Los cambios en el uso del suelo y la intensificación en el consumo de agua han provocado la degradación de los principales ecosistemas (Aznar, Belmonte, Velasco, & Valera, 2021). El aumento proyectado de la población mundial tendrá lugar en países en desarrollo que ya sufren problemas de agua (Bouwer, 2000). Todos estos efectos afectan de manera adversa al bienestar (Tsur & Zemel, 1998). El sector agrícola

agrava este problema, pues es el principal usuario de agua y responsable del 70 % de las extracciones de agua dulce y de más del 90 % de su uso consuntivo (FAO, 2013). Además, el riego es reconocido como el principal contribuyente a la degradación del ecosistema del agua (Flávio, Ferreira, Formigo, & Svendsen, 2017).

En México, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos lo representa el uso agrupado agrícola, principalmente para riego. El Registro Público de Derechos de Agua (2022) registró 59.408 miles de hm³ para uso agrícola (38.176 miles de hm³ de origen superficial y 21.232 miles de hm³ de origen subterráneo), que representaron el 67.1 % de total de extracción de los diferentes usos consuntivos.

Bajo condiciones de escasez de agua, un enfoque económico ayuda a identificar asignaciones eficientes de agua y reducir las prácticas derrochadoras. Dada la alta proporción de agua utilizada para la agricultura en ciertas regiones, el valor económico del agua agrícola puede ser una herramienta importante para la gestión del agua y el desarrollo de políticas (Medellín, Harou, & Howitt, 2010), y para maximizar el valor que proporciona a la sociedad (Fisher *et al.*, 2002). El valor económico del agua sirve como guía para asignar el agua entre usos alternativos, potencialmente dirigiendo el agua y sus recursos complementarios hacia usos en los que producen el mayor rendimiento económico total (Ward & Michelsen, 2002); permite una comparación imparcial entre usos (Fisher *et al.*, 2002), y establece un marco para evaluar las compensaciones y sinergias entre los usos competitivos del agua (Harou *et al.*, 2009).

La gestión de los recursos hídricos se considera el principal desafío para el desarrollo debido a que el crecimiento de la población, el desarrollo económico y los cambios técnicos son los principales factores del consumo de agua (Wang *et al.*, 2018). Esto implica un mayor uso de agua no agrícola (industrial, doméstico y municipal), el cual ejercerá presión sobre el suministro de agua agrícola y, en consecuencia, afectará la producción agrícola en los próximos años (Xiong *et al.*, 2010).

La escasez de agua y el deterioro de la calidad de los recursos hídricos en los últimos años han llevado al reconocimiento de que se debe adoptar una gestión moderna de estos recursos. Los recursos hídricos alternativos incluyen la desalinización del agua de mar y la recuperación de aguas residuales (Bakopoulou, Polyzos, & Kungolos, 2010). La reutilización del agua tratada para el riego agrícola se considera una opción prometedora en las regiones que enfrentan problemas de escasez de agua (Alcon *et al.*, 2010), al mismo tiempo que no ha sido explotado el potencial que tiene esta fuente de agua (Hernández-Sancho, Lamizana-Diallo, Mateo-Sagasta, & Qadir, 2015).

México ocupa el primer lugar a nivel mundial en el uso de aguas residuales tratadas utilizadas para riego con 4.4 millones de m³/día, seguidos por Egipto, China y Siria con 1.9, 1.2 y 1.1 millones de m³/día, respectivamente. En cuanto a aguas residuales sin tratar para la agricultura, México es el segundo a nivel mundial solo después de China (Jiménez & Asano, 2008). En cuanto a superficie regada con aguas tratadas, China ocupa el primer lugar con 3.6 millones de hectáreas, seguidos de otros diez países (Figura 1) (AQUASTAT, 2022).

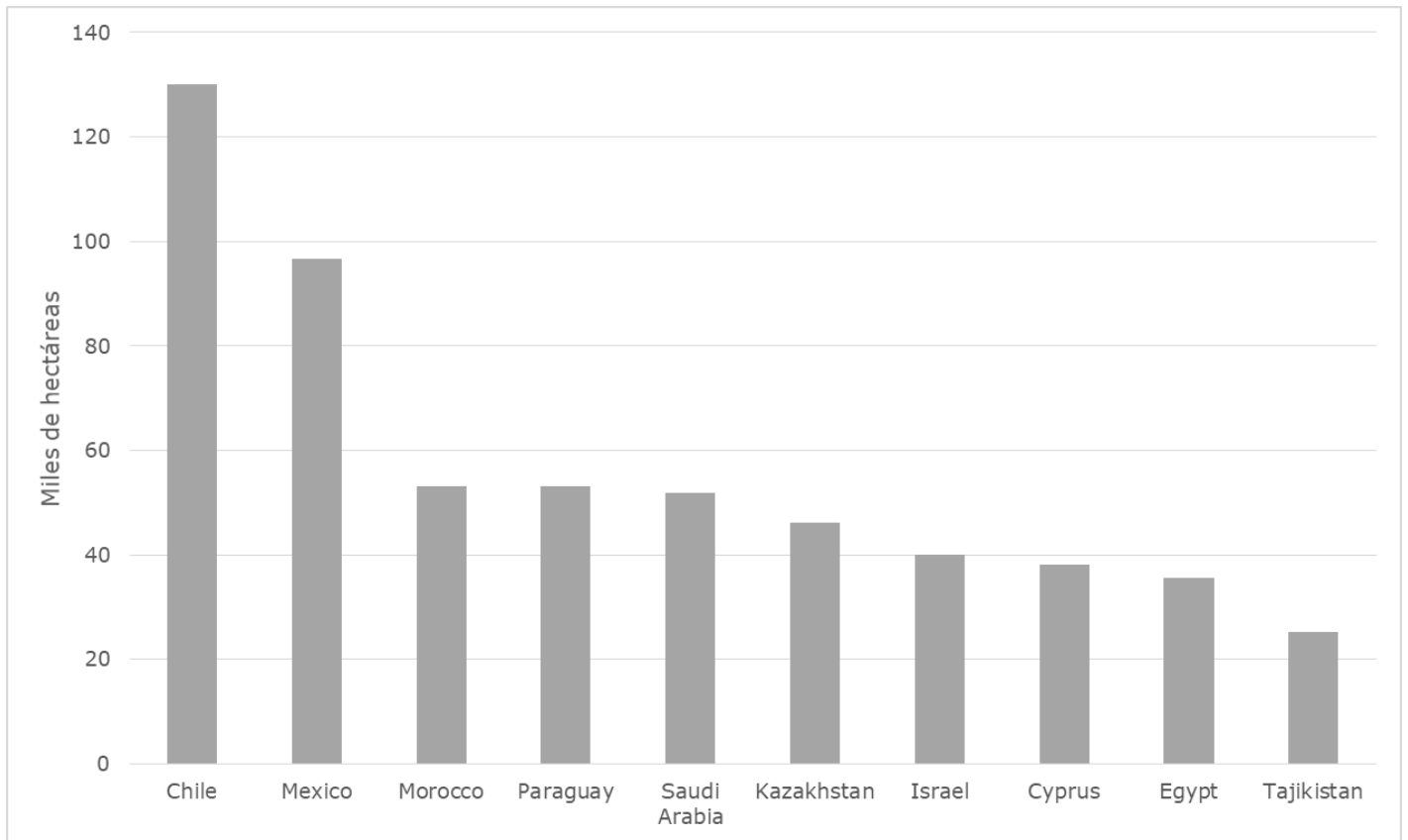


Figura 1. Superficie equipada para riego por aprovechamiento directo de aguas residuales municipales tratadas. Fuente: elaboración propia con datos de AQUASTAT (2022).

El sistema del Valle del Mezquital es el ejemplo más grande y antiguo del mundo con respecto al uso de aguas residuales sin tratar para riego agrícola (Lesser *et al.*, 2018). Más de 90 000 ha de tierras de cultivo se riegan con las aguas residuales no tratadas de la Ciudad de México, que se distribuyen en los distritos de riego agrícola de Tula, Ajacuba y Alfajayucan. La alta disponibilidad de agua residual ha puesto a los agricultores en una zona de comodidad y donde el tratamiento de estas

aguas se percibe como una amenaza (Durán, Jiménez, Rodríguez, & Prado, 2021).

En suma, el incremento de la población, problemas de disponibilidad, escasez, sobreexplotación y contaminación del agua, cambio climático, calentamiento global y ante un incremento en la demanda de agua para riego en los últimos años, se necesitan tomar medidas de política que contribuyan al uso y asignación eficiente del recurso agua en la agricultura. En este sentido, el valor económico contribuye a lograr el objetivo de decisiones racionales que apoyan la asignación óptima de agua. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es determinar el valor económico del agua residual en el Distrito de Riego (DR) 003 Tula, Hidalgo, en diferentes escenarios de escasez de acuerdo con el patrón de cultivos del año agrícola 2020-2021. Mediante el uso de la programación lineal, calcular el valor económico del agua, a partir del análisis de los precios sombra y la combinación óptima de los cultivos con y sin escasez de agua y la maximización del ingreso neto del distrito de riego, con el propósito de establecer un rango de precio del recurso en cuestión.

La hipótesis establece que los precios que pagan los usuarios del distrito de riego son menores al valor económico del agua y no reflejan el valor de escasez.

Materiales y métodos

Área de estudio

El DR 003 Tula se creó por acuerdo presidencial el 20 de enero de 1955. Se encuentra en el estado de Hidalgo, en la región hidrológica Pánuco, en la región hidrológico-administrativa Valle de México. La superficie total es de 50 104 ha regables de las cuales 53.2 % es ejidal y 46.8 % es pequeña propiedad. Cuenta con 37 267 usuarios, de los cuales, 57.6 % son ejidatarios y 42.4 % pequeños propietarios. La parcela promedio en el DR es 1.34 ha, en la ejidal 1.24 ha y en la pequeña propiedad 1.49 ha. Comprende parte de 17 municipios del Valle del Mezquital: Atotonilco, Tula, Atitalaquia, Tlaxcoapan, Tetepango, Tlahuelilpan, Tezontepec, Tepetitlán, Mixquiahuala, Francisco I. Madero, Progreso de Obregón, Chilcuautla, San Salvador, Actopan, Santiago de Anaya, Ixmiquilpan y El Cardonal (Figura 2).

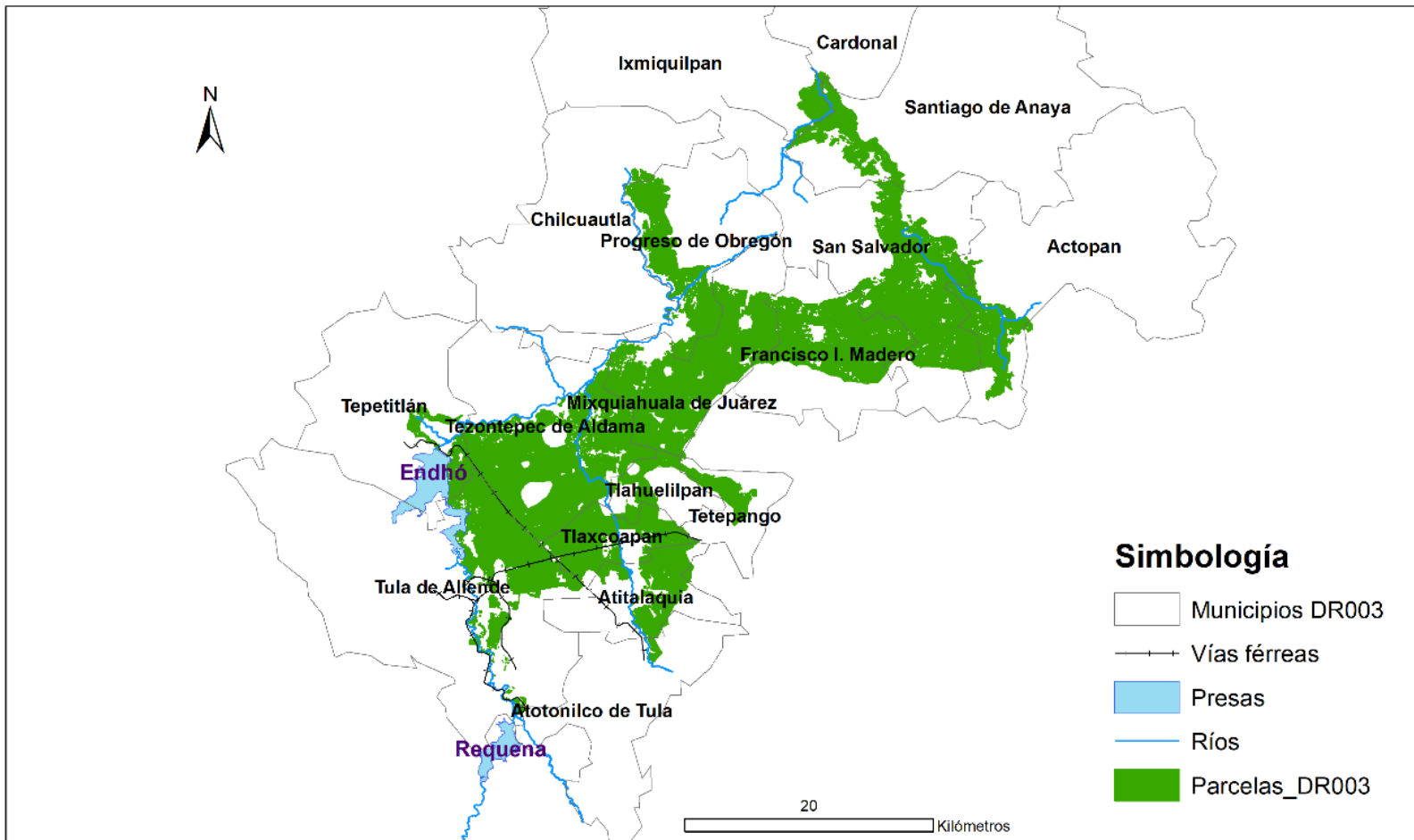


Figura 2. Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo. Fuente: elaboración propia con datos del DR 003.

El DR 003 Tula se integra por 16 módulos de riego: módulo 01 Actopan; módulo 02 Tlamaco-Juandho; módulo 03 Mixquiahuala; módulo 04 Endho-Xoxhitlan; módulo 05 Tepatepec; módulo 06 Alto Tepatepec; módulo 07 Tula; módulo 08 El Tumba; módulo 09 Artículo 27; módulo 10 Dendho-Cardonal; módulo 11 Cerro El Xicuco; módulo 12 El Solís; módulo

13 Gamagaox; módulo 14 El Bexha; módulo 15 Bombeo Agrícola Teltipan, y módulo 16 Bombeo Cerro Juandho de Teltipan (Conagua, 2020).

Modelo de programación lineal

Hay dos técnicas para modelar la demanda de agua, que son técnicas de valoración inductivas y deductivas. Las técnicas deductivas suelen utilizar programación lineal, tratan de reproducir las decisiones de los agricultores a nivel de finca o distrito de riego, y la mayoría maximiza las ganancias o los ingresos brutos (Harou *et al.*, 2009).

Los modelos de programación lineal son una herramienta para determinar la asignación óptima de los recursos escasos, con el fin de reducir el consumo de agua y aumentar la producción en planes de gestión de este recurso (Daghighi, Nahvi, & Kim, 2017), así como maximizar el beneficio económico neto agregado del uso del agua en el sistema (Harou *et al.*, 2009).

La investigación se realizó con información estadística del año agrícola 2020-2021 del DR 003 Tula, perteneciente a la Dirección Local Hidalgo de la Comisión Nacional del Agua (Conagua). Los coeficientes técnicos utilizado en el modelo de programación lineal (MPL) se enfocaron en el uso de agua por cada uno de los cultivos para el periodo de análisis únicamente y en los diferentes ciclos de producción disponibles. Debido a que el MPL no acepta variables negativas, el recurso tierra mínimo utilizado fue de una hectárea. Los precios netos se calcularon restando los costos variables de cada cultivo i con el valor de la producción del cultivo i .

Con esta información se formuló un MPL, cuyos resultados permitieron conocer el precio sombra de agua. La programación lineal encuentra el valor marginal de agua en sistemas de riego con más de un cultivo, plantea diferentes escenarios, y asigna superficies o patrones óptimos de cultivo (Zetina, Mora, Martínez, Cruz, Téllez, 2013).

El modelo planteado tiene como función objetivo maximizar el ingreso neto de los productores del DR 003 Tula, sujeto a la disponibilidad de superficie de tierra y agua, así como restricciones de máximos y mínimos por cultivos. El modelo incluye actividades del ciclo otoño-invierno (O-I), primavera-verano (P-V) y perennes (PER). El modelo matemático se planteó de la siguiente manera:

$$Max INT = \sum_{i=1}^I c_i X_i + \sum_{j=1}^J c_j X_j + \sum_{k=1}^K c_k X_k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^I a_i X_i \leq S_{O-I} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j X_j \leq S_{P-V} \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^K a_k X_k \leq S_{PER} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I b_i X_i \leq V_{O-I} \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J b_j X_j \leq V_{P-V} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k X_k \leq V_{PER} \quad (7)$$

$$X_i, X_j, X_k \geq 0 \quad (8)$$

Donde:

INT = ingreso neto total

c_i, c_j, c_k = ingreso neto de las actividades de producción en el ciclo otoño-invierno, primavera-verano y perennes, respectivamente. Se calculó con el valor de la producción de cada cultivo (rendimiento por precio medio rural) menos el costo variable de producción

X_i, X_j, X_k = valores por obtener de las superficies óptimas a sembrar de cada cultivo en los ciclos otoño-invierno, primavera-verano y perennes

a_i, a_j, a_k = coeficientes técnicos necesario para producir una unidad del cultivo, para los ciclos de otoño-invierno, primavera-verano y perenes, respectivamente; se refieren a la cantidad mínima de tierra que se requiere para producir (una hectárea)

b_i, b_j, b_k = cantidad del recurso agua necesario para producir una unidad del cultivo en m^3 de acuerdo con la época en que son sembrados, con base en los datos obtenidos en el distrito de riego por cultivo y por época

de producción. Se calculó multiplicando la lámina neta de cada cultivo en cada ciclo agrícola (en metros) por la superficie de 10 000 m²

$V_{O-I}, V_{P-V}, V_{PER}$ = volumen neto total de agua disponible en los ciclos otoño-invierno, primavera-verano y perennes del año agrícola 2020-2021

$S_{O-I}, S_{P-V}, S_{PER}$ = superficies cosechadas máximas de los ciclos otoño-invierno, primavera-verano y perennes del año agrícola 2020-2021

El modelo incluyó 21 actividades y los cultivos analizados corresponden al año agrícola 2020-2021 (Tabla 1).

Tabla 1. Actividades y precio neto.

Variable	Actividad (cultivo)	Precio neto miles de \$ MN
X ₁	Avena forrajera	5.62
X ₂	Brócoli	99.87
X ₃	Cebada forrajera	5.63
X ₄	Coliflor	131.00
X ₅	Haba	59.00
X ₆	Nabo	30.30
X ₇	Rye grass	5.05
X ₈	Trigo grano	35.98
X ₉	Triticale	35.97
X ₁₀	Avena forrajera	5.65
X ₁₁	Brócoli	99.93
X ₁₂	Calabacita	102.93
X ₁₃	Chile	105.41
X ₁₄	Coliflor	131.00
X ₁₅	Frijol	37.97
X ₁₆	Haba	59.00
X ₁₇	Maíz grano	43.96
X ₁₈	Nabo	30.80
X ₁₉	Tomate de cáscara	67.00
X ₂₀	Alfalfa	51.47
X ₂₁	Bermuda	26.49

Por lo tanto, la función objetivo del modelo extendido se planteó de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Max INT} = & 5.62X_1 + 99.87X_2 + 5.63X_3 + 131X_4 + 59X_5 + 30.3X_6 + 5.05X_7 + \\ & 35.98X_8 + 35.97X_9 + 5.65X_{10} + 99.93X_{11} + 102.93X_{12} + 105.41X_{13} + 131X_{14} + \\ & 37.97X_{15} + 59X_{16} + 43.96X_{17} + 30.8X_{18} + 67X_{19} + 51.47X_{20} + 26.49X_{21} \end{aligned} \quad (9)$$

Las restricciones del modelo en el año agrícola fueron:

a) La restricción de tierra en el ciclo O-I:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8 + X_9 \leq 8\,920 \quad (10)$$

b) La restricción de tierra en el ciclo P-V:

$$X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16} + X_{17} + X_{18} + X_{19} \leq 19\,626 \quad (11)$$

c) La restricción de tierra en los perennes:

$$X_{20} + X_{21} \leq 21\,557 \quad (12)$$

d) La restricción de agua en el ciclo O-I:

$$6.16X_1 + 10.3X_2 + 6.23X_3 + 11.46X_4 + 6.71X_5 + 6.32X_6 + 7.83X_7 + 9.24X_8 + 9.35X_9 \leq 60\ 637.3 \quad (13)$$

e) La restricción de agua en el ciclo P-V:

$$6.14X_{10} + 11.64X_{11} + 10.24X_{12} + 11.80X_{13} + 12.61X_{14} + 6.99X_{15} + 7.09X_{16} + 12.02X_{17} + 6.73X_{18} + 10.85X_{19} \leq 228\ 655.2 \quad (14)$$

f) La restricción de agua en los perennes:

$$21.22X_{20} + 17.89X_{21} \leq 456\ 087.6 \quad (15)$$

g) La restricción de superficie máxima de los cultivos del año agrícola 2020-2021 (Tabla 2).

Tabla 2. Superficie máxima de los cultivos.

Variable	Cultivo	Hectáreas
X ₁	Avena forrajera	5 503
X ₂	Brócoli	104
X ₃	Cebada forrajera	1 312
X ₄	Coliflor	554
X ₅	Haba	68
X ₆	Nabo	513
X ₇	Rye grass	407
X ₈	Trigo grano	272
X ₉	Triticale	187
X ₁₀	Avena forrajera	60
X ₁₁	Brócoli	102
X ₁₂	Calabacita	552
X ₁₃	Chile	291
X ₁₄	Coliflor	783
X ₁₅	Frijol	1 019
X ₁₆	Haba	7
X ₁₇	Maíz grano	16 511
X ₁₈	Nabo	172
X ₁₉	Tomate de cáscara	129
X ₂₀	Alfalfa	21 186
X ₂₁	Bermuda	371

Se plantearon nueve escenarios para evaluar el impacto de la disponibilidad del agua. El escenario 1 incluyó las restricciones de superficie y volumen: totales, ciclo O-I, P-V y perennes; restricciones de máximos en todos los cultivos para modelar algo similar al año agrícola 2020-2021. Del escenario 2 al 6 las restricciones son las mismas que el escenario 1, solo cambió la disponibilidad del agua v_t en 90, 80, 70, 60 y 50 %, respectivamente. El escenario 7 simuló un incremento de la población mediante la reducción del 20 % en la superficie cosechada y en la disponibilidad de agua. El escenario 8 incluyó solo 12 restricciones de superficie máxima los siguientes cultivos: brócoli, calabacita, chile, coliflor, frijol, haba, nabo, y tomate de cáscara o tomatillo, que tienen restricciones debido a la calidad del agua. El escenario 9 no incluyó ninguna restricción de máximos de los cultivos.

Para resolver el modelo se utilizó el método Simplex con la herramienta de análisis Solver® de Microsoft Office Excel®.

Resultados

Los resultados del modelo de programación lineal para los diferentes escenarios con información de los ciclos agrícolas O-I, P-V y perennes de 2020-2021 del DR 003 Tula indicaron que la superficie sembrada se redujo al disminuir la disponibilidad de agua (Figura 3).

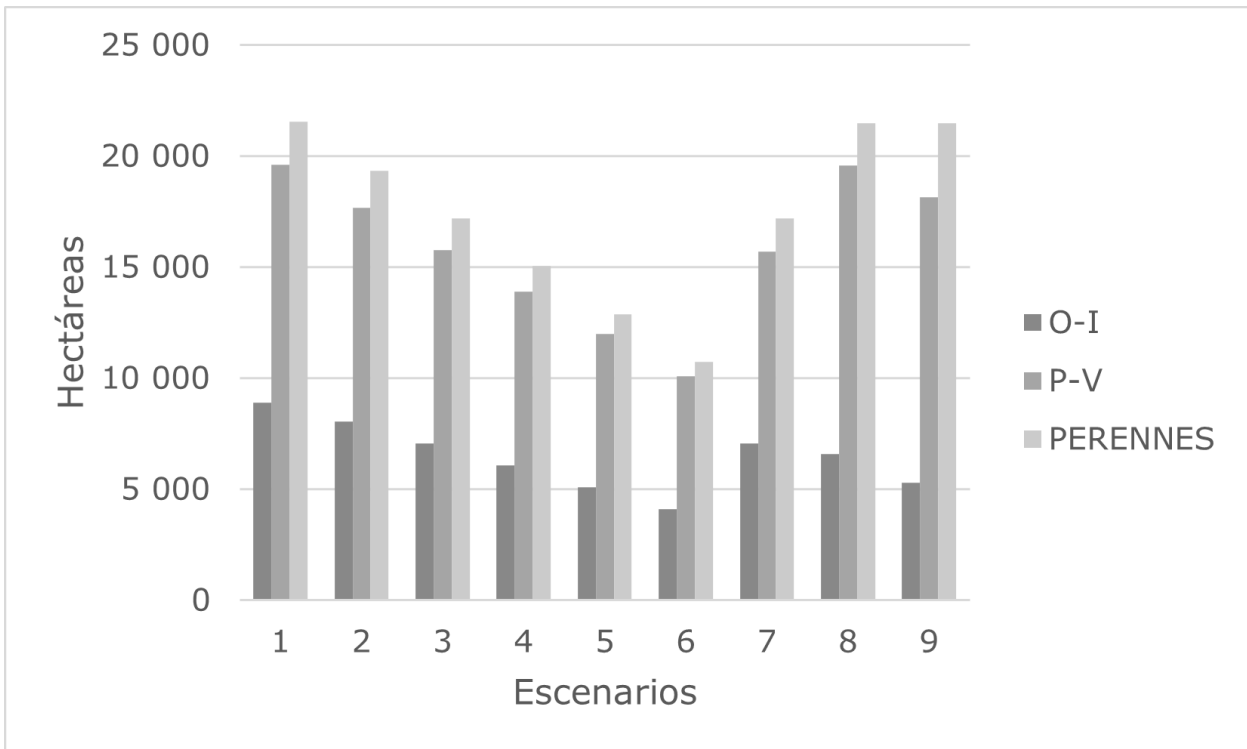


Figura 3. Superficie sembrada en los diferentes escenarios.

En el escenario 1 solo se sembraron 5 ha menos en relación con el año agrícola 2020-2021. En el escenario 2, el INT fue 8.6 % menos que lo percibido en el año agrícola 2020-2021 y la superficie total del padrón óptimo fue 10 % menos que la superficie cosechada en el año agrícola. En el escenario 3, el INT disminuyó 17.5 % y la superficie sembrada se redujo 20 %. En el escenario 4, el INT disminuyó 26.4 %, la superficie sembrada disminuyó 30.1 %. En el escenario 5, el INT fue 35.3 % menor que el del año agrícola 2020-2021. En el escenario 6, el INT se redujo en 44.3 % y disminuyó 50.2 % la superficie sembrada. En el escenario 7, el INT fue 17.6 % menos que lo percibido en el año agrícola y 20.2 % menos superficie sembrada. En el escenario 8, el INT incrementó 6.4 % y disminuyó 4.8 % la superficie sembrada. En el escenario 9, el total de

superficie fue 10.3 % menos que lo cosechado en el año agrícola 2020-2021, pero 86.5 % más en el ingreso neto total debido a que estos cultivos son los que mayor valor tienen en el mercado (Tabla 3).

Tabla 3. Padrón óptimo de cultivos en los diferentes escenarios.

Cultivo	2020-2021	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Avena forrajera	5 503	5 503	5 503	5 376	4 392	3 408	2 424	5 376	0	0
Brócoli	104	104	104	104	104	104	104	104	104	0
Cebada forrajera	1 312	1 312	847	0	0	0	0	0	0	0
Coliflor	554	554	554	554	554	554	554	554	554	5 290
Haba	68	68	68	68	68	68	68	68	68	0
Nabo	513	513	513	513	513	513	513	513	513	0
Rye grass	407	404	0	0	0	0	0	0	0	0
Trigo grano	272	272	272	272	272	272	272	272	5 360	0
Triticale	187	187	187	187	187	187	187	187	0	0
Avena forrajera	60	59	0	0	0	0	0	0	0	0
Brócoli	102	102	102	102	102	102	102	102	102	0
Calabacita	552	552	552	552	552	552	552	552	552	0
Chile	291	291	291	291	291	291	291	291	291	0
Coliflor	783	783	783	783	783	783	783	783	783	18 140
Frijol	1 019	1 019	1 019	1 019	1 019	1 019	1 019	985	1 019	0
Haba	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0
Maíz grano	16 511	16 511	14 638	12 736	10 833	8 931	7 028	12 852	16 541	0
Nabo	172	172	172	172	172	172	172	0	172	0
Tomate de cáscara	129	129	129	129	129	129	129	129	129	0
Alfalfa	21 186	21 186	19 349	17 199	15 049	12 899	10 749	17 199	21 498	21 498
Bermuda	371	370	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie total (ha)	50 103	50 098	45 090	40 063	35 027	29 990	24 954	39 973	47 694	44 929
Ingreso neto (millones de pesos)	2 240	2 239	2 048	1 848	1 648	1 448	1 248	1 846	2 382	4 176
Disponibilidad de agua	100 %	100 %	90 %	80 %	70 %	60 %	50 %	80 %	100 %	100 %
(Millones de m ³)	745380	745380	670842	596304	521766	447228	372690	596304	745380	745380

Fuente: elaboración propia con la información de las salidas de los MPL en Excel.

En el escenario 1 no hubo variación significativa en los cultivos con respecto al año agrícola de estudio. En los escenarios 2 al 9, los cultivos que disminuyeron totalmente la superficie sembrada fueron rye grass, avena forrajera (P-V) y bermuda. En el escenario 8 se incrementó en gran medida la superficie sembrada de trigo grano. En el escenario 9, solo se activaron los siguientes cultivos: coliflor para el ciclo O-I, coliflor para el ciclo P-V y alfalfa (Figura 4).

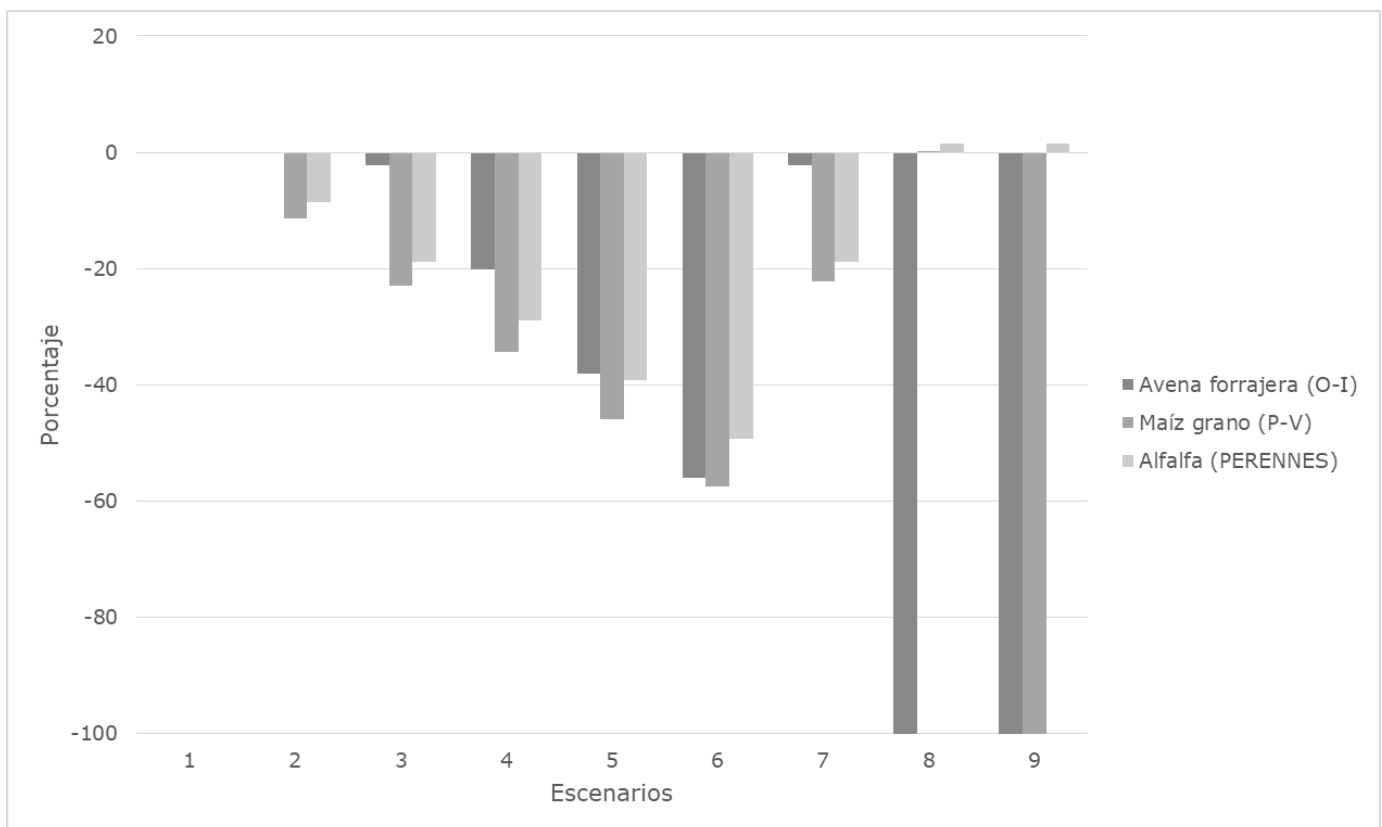


Figura 4. Variación de la superficie sembrada de los principales cultivos en los diferentes escenarios.

Ante la escasez o reducciones en la disponibilidad de agua, la superficie sembrada disminuye, y los cultivos que reducen a cero la superficie son los siguientes: cebada forrajera y rye grass en el ciclo O-I; avena forrajera en el ciclo P-V, y la bermuda en los perennes. Estos cultivos tienen menor precio de mercado, alto costo de producción y mayor consumo de agua, es decir, menor ingreso neto. Tales resultados concuerdan con los de Zetina *et al.* (2013). También se puede observar que disminuye la superficie alfalfa debido a la alta demanda de agua y su baja rentabilidad (Martínez, Mora, Exebio, Arana, & Arjona, 2021; Godínez *et al.*, 2007).

El costo reducido indica cuánto disminuiría el ingreso neto total si se incluyera dentro del escenario de producción el cultivo no factible dentro de la solución óptima; de otra manera representa en cuánto debería incrementar el valor del coeficiente objetivo para que el precio neto fuera competitivo en la función objetivo; es decir, el costo reducido está asociado con las actividades de producción, mientras que el precio sombra con los recursos de las restricciones. En el escenario 1, los costos reducidos fueron cero, esto es, al cambiar en una unidad la superficie cultivada, no se modificaría el ingreso neto total. El costo reducido de cada cultivo fue el mismo para los escenarios 2 al 6, y que de haber incluido los cultivos no seleccionados en el padrón óptimo, se habría reducido el INT en esa cantidad (Tabla 4).

Tabla 4. Costo reducido en los diferentes escenarios.

Ciclo	Cultivo	1	2	3	4	5	6	7	8	9
O-I	Avena forrajera	0	0	0	0	0	0	0	-18.4	-64.8
	Brócoli	0	0	0	0	0	0	0	0	-17.8
	Cebada forrajera	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-18.7	-65.6
	Coliflor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Haba	0	0	0	0	0	0	0	0	-17.7
	Nabo	0	0	0	0	0	0	0	0	-41.9
	Rye grass	0	-2.0	-2.1	-2.1	-2.1	-2.1	-2.1	-25.5	-84.5
	Trigo grano	0	0	0	0	0	0	0	0	-69.6
	Triticale	0	0	0	0	0	0	0	-0.4	-70.9
P-V	Avena forrajera	0	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-16.8	-31.3	-16.8	-58.1
	Brócoli	0	0	0	0	0	0	0	0	-21.0
	Calabacita	0	0	0	0	0	0	0	0	-3.4
	Chile	0	0	0	0	0	0	0	0	-17.2
	Coliflor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Frijol	0	0	0	0	0	0	0	0	-34.6
	Haba	0	0	0	0	0	0	0	0	-14.6
	Maíz grano	0	0	0	0	0	0	0	0	-80.9
	Nabo	0	0	0	0	0	0	-6.9	0	-39.1
	Tomate de cáscara	0	0	0	0	0	0	0	0	-45.8
PER	Alfalfa	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Bermuda	0	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9	-16.9

Fuente: elaboración propia con la información de las salidas de los MPL en Excel.

El precio sombra indica en cuánto cambia el ingreso neto total al cambiar una unidad de la restricción o la disponibilidad de los recursos, es decir, indica el cambio en el objetivo si la restricción se relajara en una unidad.

Si el precio sombra del agua fuera cero, al reducir o aumentar en una unidad el consumo de agua, el ingreso neto total no reduciría ni aumentaría debido a que la disponibilidad del recurso no se agota. En este caso, se puede saber cuál es la cantidad no utilizada del recurso en la solución óptima mediante el uso de variables de holgura y la desigualdad débil de la restricción pasa a ser una igualdad (Kaiser & Messer, 2011).

Al reducir 10 % la disponibilidad de agua, es decir, del escenario 1 a 2, el precio sombra se incrementó 40 % en el ciclo O-I, 297.2 % en el ciclo P-V y 63.8 % en los perennes, mientras que el precio sombra de la tierra se incrementó cuando se redujo la disponibilidad de la superficie en 20 % (Tabla 5).

Tabla 5. Precio sombra en los diferentes escenarios.

Restricción	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Superficie O-I	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Superficie P-V	0	0	0	0	0	0	29.64	0	0
Superficie, perennes	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Volumen O-I	0.64	0.90	0.91	0.91	0.91	0.91	0.91	3.89	11.43
Volumen P-V	0.92	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66	1.19	3.66	10.39
Volumen, perennes	1.48	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43	2.43
Restricción en la superficie sembrada de los cultivos									
Avena forrajera O-I	1.65	0.06	0	0	0	0	0		
Brócoli O-I	93.23	90.58	90.48	90.48	90.48	90.48	90.48	59.76	
Cebada forrajera O-I	1.61	0	0	0	0	0	0		
Coliflor O-I	123.61	120.66	120.54	120.54	120.54	120.54	120.54	86.36	
Haba O-I	54.67	52.94	52.88	52.88	52.88	52.88	52.88	32.87	
Nabo O-I	26.23	24.60	24.54	24.54	24.54	24.54	24.54	5.69	
Ray grass O-I	0	0	0	0	0	0	0		
Trigo grano O-I	30.02	27.64	27.55	27.55	27.55	27.55	27.55		
Triticale O-I	29.94	27.53	27.44	27.44	27.44	27.44	27.44		
Avena forrajera P-V	0	0	0	0	0	0	0		
Brócoli P-V	89.21	57.36	57.36	57.36	57.36	57.36	56.42	57.36	
Calabacita P-V	93.51	65.49	65.49	65.49	65.49	65.49	61.09	65.49	
Chile P-V	94.54	62.24	62.24	62.24	62.24	62.24	61.71	62.24	
Coliflor P-V	119.39	84.89	84.89	84.89	84.89	84.89	86.34	84.89	
Frijol P-V	31.53	12.41	12.41	12.41	12.41	12.41	0	12.41	
Haba P-V	52.47	33.08	33.08	33.08	33.08	33.08	20.91	33.08	
Maíz grano P-V	32.9	0	0	0	0	0	0		
Nabo P-V	24.60	6.18	6.18	6.18	6.18	6.18	0	6.18	
Tomatillo P-V	57.01	27.31	27.31	27.31	27.31	27.31	24.43	27.31	
Alfalfa	20.06	0	0	0	0	0	0		
Bermuda	0	0	0	0	0	0	0		

Fuente: elaboración propia con la información de las salidas de los MPL en Excel.

Discusión

Martínez *et al.* (2021) obtuvieron precios sombra que varían de 0.11 a 40.11 $\$/m^3$ en diferentes escenarios del DR 100 Alfajayucan; Ramirez, Gonzalez, Valdivia, Salas y García (2019) encontraron para el DR 017 Comarca Lagunera precios sombra en riego por gravedad de 0.91 a 1.23 $\$/m^3$ con diferente disponibilidad de agua. Florencio, Valdivia y Scott (2002) obtuvieron precios sombra para la fuente superficial que van de 0.54 a 2.28 $\$/m^3$ en diferentes escenarios del DR 011 Alto Río Lerma. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos en estos escenarios, que varían de 0.64 a 11.43 $\$/m^3$. Como se observa del escenario 3 al 6, el precio sombra no cambia, aunque cambie la disponibilidad de agua, debido a que el precio sombra depende de la última actividad que entra al modelo. Los resultados demostraron que el precio sombra aumentó para los escenarios 8 y 9 debido al cambio del patrón de cultivos; esto demuestra que en el caso del agua, al ser un recurso escaso, debería sugerirse un precio más alto cuando se imponen restricciones en la función objetivo, pues el ingreso neto para estos escenarios también fue el más alto debido a la mayor demanda de agua en los periodos de primavera-verano y otoño-invierno.

Los valores de precio sombra concuerdan con los publicados por Rodríguez, Medellín, Valdivia, Arana y García (2019), ya que en aquellos módulos de producción con un precio sombra bajo se tiende a exportar agua a módulos con un precio sombra más alto debido a escasez de agua por dos razones principales: en primer lugar, se siembran cultivos de bajo valor (sorgo y trigo) y en segundo lugar tiene un acceso limitado a las

aguas subterráneas. Por otro lado, tuvieron módulos de producción que participarían en el mercado de agua exportando una baja tasa de ésta disponible debido a su alto consumo de agua de pozos mayor que su uso de agua superficial, y que es usada en hortalizas, en particular brócoli, espárragos y lechugas.

El precio que pagan en promedio en el DR 003 es de 0.011\$/m³, es decir, 58.6 veces más bajo que el precio sombra encontrado en el modelo. A diferencia de Ramirez *et al.* (2019), encontraron un precio sombra 9.06 veces mayor que la tarifa pagada por unidad de agua en la Comarca Lagunera; para Florencio *et al.* (2002) fue 13.5 veces menor que los precios sombra obtenidos en el DR 011. En el DR 100 encontraron que el precio sombra es 72 veces mayor que la cuota de conservación y mantenimiento de los canales que pagan los productores agrícolas (Martínez *et al.*, 2021). En consecuencia, el precio que pagan los productores por el agua no refleja el verdadero valor de este recurso. Por otro lado, Martínez *et al.* (2021) también mencionan que los precios sombra del agua de riego para los escenarios establecidos simbolizaron el precio máximo que los agricultores estarían dispuestos a pagar por cada m³ adicional de agua en un año agrícola.

Godínez *et al.* (2007) y Martínez *et al.* (2021) han recomendado el aumento de la cuota que pagan los productores. Sin embargo, en este caso, la recomendación de incrementar las cuotas a los productores debe hacerse de manera reservada debido a que el precio sombra del agua es similar al precio sombra de otros distritos de riego que riegan con agua de mejor calidad. Más bien, la recomendación sería incrementar el uso de agua residual tratada en la agricultura para cultivos recomendados.

Conclusiones

Al reducir la disponibilidad de agua en el DR 003 Tula se reduce la superficie sembrada total, así como la superficie de los cultivos menos rentables, y al no haber restricción de superficies máximas en los cultivos, el padrón óptimo elige aquellos cultivos de mayor valor, como coliflor y alfalfa. Sin embargo, hay restricción en la superficie sembrada debido a la calidad del agua, aunque el precio sombra sea mayor en los cultivos de coliflor, brócoli, calabacita y chile.

Ante escenarios de escasez, el costo de oportunidad de utilizar una unidad adicional de agua es mayor. Aun así, las cuotas que pagan los agricultores del DR 003 Tula son menores a los precios sombra o al valor económico por unidad de agua obtenidos en los diferentes escenarios, es decir, no reflejan el verdadero valor del recurso, por lo que se recomienda que las cuotas que pagan los productores se incrementen gradualmente, sobre todo, en los cultivos más rentables y de mayor demanda de agua.

Se concluye que al incrementar la escasez en los escenarios, el valor del agua mediante el uso del precio sombra es indicativo de cómo mejoraría la solución óptima si se dispusiera de una unidad extra de este recurso. El MPL puede determinar qué tanto pudiera incrementar el valor en el recurso escaso, pues cuando éste es abundante, el precio sombra tiende a cero y cuando escasea comienza a incrementar su valor. Lo mismo ocurre con el costo reducido para cada actividad de producción, lo cual indica que se debería mejorar el precio de mercado del cultivo o

reducir sus costos variables, a fin de que las actividades no seleccionadas en la función objetivo pudieran ser producidas.

Desde el punto de vista de la política económica de México, los MPL pueden ser una herramienta valiosa para la determinación del valor del agua y con ello establecer cuotas que limiten su uso, y se siembren los cultivos que se consideren factibles a ser producidos con los recursos con que se cuentan.

Referencias

- Alcon, F., Pedrero, F., Martin, J., Arcas, N., Alarcon, J. J., & De Miguel, M. D. (2010). The non-market value of reclaimed wastewater for use in agriculture: A contingent valuation approach. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 8(Suppl. 2), 1-6. DOI: 10.5424/sjar/201008s2-1361
- AQUASTAT. (2022). *Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua y la agricultura*. Recuperado de <https://www.fao.org/aquastat/en/databases/maindatabase/>
- Aznar, J. A., Belmonte, L. J., Velasco, J. F., & Valera, D. L. (2021). Farmers' profiles and behaviours toward desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain. *Journal of Cleaner Production*, 296. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126568
- Bakopoulou, S., Polyzos, S., & Kungolos, A. (2010). Investigation of farmers' willingness to pay for using recycled water for irrigation in Thessaly region, Greece. *Desalination*, 250(1), 329-334. DOI: 10.1016/j.desal.2009.09.051

- Bouwer, H. (2000). Integrated water management: Emerging issues and challenges. *Agricultural Water Management*, 45(3), 217-228. DOI: 10.1016/S0378-3774(00)00092-5
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Plan de Riego para el año agrícola 2020-2021*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional del Agua.
- Daghighi, A., Nahvi, A., & Kim, U. (2017). Optimal cultivation pattern to increase revenue and reduce water use: Application of linear programming to Arjan plain in Fars province. *Agriculture*, 7(9). DOI: 10.3390/agriculture7090073
- De Anda, J., & Shear, H. (2021). Sustainable wastewater management to reduce freshwater contamination and water depletion in Mexico. *Water*, 13(16). DOI: 10.3390/w13162307
- Durán, J. C., Jiménez, B., Rodríguez, M., & Prado, B. (2021). The Mezquital Valley from the perspective of the new Dryland Development Paradigm (DDP): Present and future challenges to achieve sustainable development. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 48, 139-150. DOI: 10.1016/j.cosust.2021.01.005
- FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Recuperado de www.fao.org/publications

- Fisher, F. M., Arlosoroff, S., Eckstein, Z., Haddadin, M., Hamati, S. G., Huber-Lee, A., Jarrar, A., Jayyousi, A., Shamir, U., & Wesseling, H. (2002). Optimal water management and conflict resolution: The Middle East Water Project. *Water Resources Research*, 38(11), 25-1-25-17. DOI: 10.1029/2001wr000943
- Flávio, H. M., Ferreira, P., Formigo, N., & Svendsen, J. C. (2017). Reconciling agriculture and stream restoration in Europe: A review relating to the EU Water Framework Directive. *Science of the Total Environment*, 596-597, 378-395. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.04.057
- Florencio, V., Valdivia, R., & Scott, C. A. (2002). Productividad del agua en el distrito de riego 011, alto Río Lerma. *Agrociencia*, 36(4), 483-493. Recuperado de <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/201/201>
- Godínez, L., García, J. A., Fortis, M., Mora, J. S., Martínez, M. A., Vladivia, R., & Hernández, J. (2007). Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 51-59. Recuperado de <https://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1438/1628>
- Harou, J. J., Pulido, M., Rosenberg, D. E., Medellín, J., Lund, J. R., & Howitt, R. E. (2009). Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. *Journal of Hydrology*, 375(3-4), 627-643. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.06.037

- Hernández-Sancho, F., Lamizana-Diallo, B., Mateo-Sagasta, M., & Qadir, M. (2015). *Economic valuation of wastewater: The cost of action and the cost of no action*. United Nations Environment Programme. Recuperado de <https://www.unep.org/resources/report/economic-valuation-wastewater-cost-action-and-cost-no-action>
- Jiménez, B., & Asano, T. (2008). Water reclamation and reuse around the world. In: Blanca, J., & Asano, T. (eds.). *Water reuse - an international survey of current practice, issues and needs* (Issue d, pp. 3-26). IWA Publishing. DOI: 10.2166/9781780401881
- Kaiser, H. M., & Messer, K. D. (2011). *Mathematical programming for agricultural, environmental, and resource economics*. New York, USA: John Wiley & Sons.
- Lesser, L. E., Mora, A., Moreau, C., Mahlknecht, J., Hernández-Antonio, A., Ramírez, A. I., & Barrios-Piña, H. (2018). Survey of 218 organic contaminants in groundwater derived from the world's largest untreated wastewater irrigation system: Mezquital Valley, Mexico. *Chemosphere*, 198, 510-521. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.01.154
- Martínez, D., Mora, J. S., Exebio, A. A., Arana, O. A., & Arjona, E. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 100, 1-12. DOI: 10.28940/terra.v39i0.544
- Medellín, J., Harou, J. J., & Howitt, R. E. (2010). Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. *Science of the Total Environment*, 408(23), 5639-5648. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.08.013

- Ramirez, B. A., Gonzalez, A., Valdivia, R., Salas, J. M., & García, J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(3), 539-550. DOI: 10.29312/remexca.v10i3.1295
- Registro Público de Derechos de Agua. (2022). *Títulos y volúmenes de aguas nacionales y bienes inherentes por uso de agua*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/informacion-estadistica-62159>
- Rodríguez, J. M., Medellín, J., Valdivia, R., Arana, O. A., & García, R. C. (2019). Insights from a calibrated optimization model for irrigated agriculture under drought in an irrigation district on the central Mexican high plains. *Water*, (11)858, 1-23. DOI: 10.3390/w11040858
- Tsur, Y., & Zemel, A. (1998). Pollution control in an uncertain environment. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 22(6), 967-975. DOI: 10.1016/s0165-1889(97)00087-0
- Wang, X. J., Zhang, J. J., Gao, J., Shahid, S., Xia, X. H., Geng, Z., & Tang, L. (2018). The new concept of water resources management in China: Ensuring water security in changing environment. *Environment, Development and Sustainability*, 20(2), 897-909. DOI: 10.1007/s10668-017-9918-8
- Ward, F. A., & Michelsen, A. (2002). The economic value of water in agriculture: Concepts and policy applications. *Water Policy*, 4(5), 423-446. DOI: 10.1016/S1366-7017(02)00039-9

- Xiong, W., Holman, I., Lin, E., Conway, D., Jiang, J., Xu, Y., & Li, Y. (2010). Climate change, water availability and future cereal production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135(1-2), 58-69. DOI: 10.1016/j.agee.2009.08.015
- Zetina, A. M., Mora, J. S., Martínez, M. A., Cruz, J., & Téllez, R. (2013). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 044, Jilotepec, estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 10(2), 139-156. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722013000200001&script=sci_abstract