



# EFFECTOS ECONÓMICOS DE LA SEQUÍA EN EL DR011 ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO

*Economic effects of drought in DR011 Alto Río Lerma, Guanajuato, Mexico*

*Efeitos econômicos da seca em DR011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México*

**Fernando Dámaso Fuentes López<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0002-5568-6500>

 [fd Fuentes@gmail.com](mailto:fd Fuentes@gmail.com)

**Ramón Valdivia Alcalá<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0003-0434-3169>

 [rvaldiviaa@chapingo.mx](mailto:rvaldiviaa@chapingo.mx)

**Juan Hernández Ortíz<sup>1</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0001-5957-594X>

 [jhernandez@chapingo.mx](mailto:jhernandez@chapingo.mx)

**Juanita Japheth Valdivia Cabral<sup>2</sup>**

 <https://orcid.org/0000-0003-0445-1880>

 [juanitavaldiviac@gmail.com](mailto:juanitavaldiviac@gmail.com)

<sup>1</sup>Dr. Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. CP. 56230. Tel. 01(595) 9521500, ext. 1665; (FDL); (RVA), (JHO).

<sup>2</sup>Dra. Universidad Autónoma de Zacatecas Av. Ramón López Velarde #117 Int. B, C.P. 98000, Zacatecas

## RESUMEN

El Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, enfrenta una creciente escasez hídrica que compromete la sostenibilidad y rentabilidad agrícola, lo que motiva la búsqueda de estrategias de manejo eficiente del agua. Pregunta de investigación ¿Cómo afectan reducciones progresivas en la disponibilidad de agua la asignación de cultivos, los ingresos agrícolas y la productividad económica del agua en los módulos Salvatierra y Cortazar del DR011 durante el ciclo 2021–2022? El objetivo fue analizar el impacto económico de reducciones progresivas en la disponibilidad de agua sobre la asignación óptima de cultivos y estimar la productividad económica del agua en los módulos Salvatierra y Cortazar del DR011 para el ciclo agrícola 2021–2022, utilizando programación lineal, complementado con análisis de sensibilidad local. La hipótesis planteó que, ante reducciones progresivas en la disponibilidad hídrica, los precios sombra del agua aumentarán significativamente y las asignaciones óptimas de superficie y los ingresos totales se modificarán de forma cuantificable. Los resultados indican que la reasignación óptima del agua modifica los patrones de cultivo, reduce la superficie sembrada, los ingresos en los escenarios de mayor escasez y, la producción agrícola agregada; asimismo, los precios sombra estimados exceden ampliamente la tarifa agrícola vigente, evidenciando una subvaloración del recurso, reflejando su relevancia como recurso limitado y estratégico en la producción. Se concluye que incorporar la valoración marginal del agua en el diseño tarifario y priorizar cultivos con mayor productividad hídrica puede mejorar eficiencia y sostenibilidad. Limitaciones: el estudio se basa en datos agregados por cultivo y módulo.

## PALABRAS CLAVES:

Agricultura De Riego, Asignación Óptima De Recursos, Precio Sombra Del Agua, Productividad Agrícola, Programación Matemática

## CÓMO CITAR:

Fecha recepción: 11 de Noviembre de 2025 / Fecha Aprobación: 13 de Marzo 2026 / Fecha Publicación: 1 de Junio 2026

Fuentes López, F. D., Valdivia Alcalá, R., Hernández Ortíz, J. & Valdivia Cabral J. J. (2026). *Efectos económicos de la sequía en el DR011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México*. Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias -FAGROPEC, 18(1), 74-98. <https://doi.org/10.47847/fagropec.v18n1a5>



Este artículo puede compartirse bajo la Licencia Creative Commons (CC BY 4.0).

Rev. FAGROPEC Vol. 18 Num. 1, enero-junio de 2026

## ABSTRACT

Irrigation District 011 Alto Río Lerma Guanajuato faces increasing water scarcity that compromises agricultural sustainability and profitability, motivating the search for efficient water management strategies. Research Question: How do progressive reductions in water availability affect crop allocation, agricultural income, and the economic productivity of water in the Salvatierra and Cortazar modules of DR011 during the 2021–2022 growing season? The objective was to analyze the economic impact of progressive reductions in water availability on optimal crop allocation and estimate the economic productivity of water in the Salvatierra and Cortazar modules of DR011 for the 2021–2022 growing season, using linear programming, complemented by local sensitivity analysis. The hypothesis stated that, with progressive reductions in water availability, shadow water prices would increase significantly, and optimal land allocations and total income would change in a quantifiable way. The results indicate that optimal water reallocation modifies cropping patterns, reduces planted area, lowers income in the most water-scarce scenarios, and decreases overall agricultural production. Furthermore, the estimated shadow prices significantly exceed the current agricultural tariff, demonstrating an undervaluation of the resource and reflecting its importance as a limited and strategic resource in production. It is concluded that incorporating the marginal valuation of water into tariff design and prioritizing crops with higher water productivity can improve efficiency and sustainability. Limitations: The study is based on aggregated data by crop and module.

## RESUMO

O Distrito de Irrigação 011 Alto Río Lerma enfrenta uma crescente escassez hídrica que compromete a sustentabilidade e a rentabilidade da agricultura, motivando a busca por estratégias eficientes de gestão da água. Pergunta de pesquisa: Como as reduções progressivas na disponibilidade de água afetam a alocação de culturas, a renda agrícola e a produtividade econômica da água nos módulos Salvatierra e Cortazar do DR011 durante a safra 2021–2022? O objetivo foi analisar o impacto econômico das reduções progressivas na disponibilidade de água sobre a alocação ótima de culturas e estimar a produtividade econômica da água nos módulos Salvatierra e Cortazar do DR011 para a safra 2021–2022, utilizando programação linear, complementada por análise de sensibilidade local. A hipótese era de que, com as reduções progressivas na disponibilidade de água, os preços da água na sombra aumentariam significativamente e as alocações ótimas de terra e a renda total sofreriam alterações quantificáveis. Os resultados indicam que a realocação ótima da água modifica os padrões de cultivo, reduz a área plantada, diminui a renda nos cenários de maior escassez hídrica e reduz a produção agrícola total. Além disso, os preços sombra estimados excedem significativamente a tarifa agrícola atual, demonstrando uma subvalorização do recurso e refletindo sua importância como um recurso limitado e estratégico na produção. Conclui-se que a incorporação da valoração marginal da água na elaboração de tarifas e a priorização de culturas com maior produtividade hídrica podem melhorar a eficiência e a sustentabilidade. Limitações: O estudo baseia-se em dados agregados por cultura e módulo.

## KEYWORDS

Irrigated Agriculture, Optimal Resource Allocation, Shadow Price Of Water, Agricultural Productivity, Mathematical Programming

## PALAVRAS CHAVE

Agricultura Irrigada, Alocação Ótima De Recursos, Preço Sombra Da Água, Produtividade Agrícola, Programação Matemática.

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso estratégico para el desarrollo humano, ambiental, social y económico que enfrenta desafíos significativos en su gestión y asignación (IMCO, 2023; UNESCO, 2020; CEDRSSA, 2016; OCDE, 2012; ONU, 1992). La advertencia del Foro Económico Mundial (WEF, 2023) sobre la posibilidad de una policrisis global para el año 2030, con una brecha estimada del 40% entre la oferta y la demanda de agua, destaca la urgencia de abordar esta problemática. Asimismo, el Banco Mundial (2024) señala que la escasez del agua es uno de los principales riesgos para el progreso económico, la erradicación de la pobreza y el desarrollo sostenible.

El estrés hídrico y la contaminación del agua dulce han agravado la escasez global de agua, potenciada por el cambio climático y la creciente competencia entre los diferentes usos (ONU, 2023; WEF, 2023). Este problema se magnifica en el ámbito agrícola, que consume aproximadamente el 70% del agua extraída a nivel mundial, llegando hasta el 95% en algunos países en desarrollo, lo que plantea serios desafíos de sostenibilidad y rentabilidad (ONU, 2022a; ONU, 2022b; ONU, 2021; FAO, 2021; FAO, 2020; UNESCO, 2019).

La FAO (2013) enfatiza la importancia de gestionar la demanda mediante la mejora en la eficiencia y la reasignación de recursos, especialmente ante el incremento esperado del 34% en la extensión de tierras de riego para 2030. A su vez, el Banco Mundial (2024) prevé que para 2050 será necesario aumentar la producción agrícola en un 60% y las extracciones de agua en un 15% para poder alimentar a una población de nueve mil millones de personas, meta que se logrará mejorando la productividad del agua.

Según la OCDE (2023), se proyecta que el crecimiento de la producción agrícola mundial sea apenas del 1,1% anual en la próxima década, una tasa considerablemente más baja en comparación con décadas anteriores, en gran parte debido a la desaceleración en el crecimiento de la productividad. Además, anticipan que la rentabilidad de los productos agrícolas se verá presionada por la tendencia a la baja en los precios internacionales de las materias primas, el menor crecimiento demográfico y el aumento en los costos de producción, impulsado por el alza en los precios de la energía, fertilizantes y los conflictos bélicos. En México se manifiestan de manera clara varios de estos problemas, ya que una parte importante del territorio nacional tiene condiciones de aridez y las sequías de los últimos años han dejado muchas presas en sus niveles más bajos, lo que ha provocado que en varios distritos de riego solo se siembre un ciclo agrícola.

En este contexto, el estado de Guanajuato enfrenta serios desafíos debido a la escasez de agua y la sobreexplotación de acuíferos (IMCO, 2023; IMTA, 2022; CONAGUA, 2020). La región ocupa el segundo lugar a nivel nacional con estrés hídrico extremo, donde el 83% del agua se destina a uso agrícola (IMCO, 2023; WRI, 2023a, WRI, 2023b) y el 80% de las extracciones de acuíferos se orientan a este sector (CONAGUA, 2024). Esta sobreexplotación de los acuíferos amenaza la viabilidad económica del Distrito de Riego 011 (DR011), donde el 90% de ellos, incluidos los de Salvatierra-Acámbaro y Valle de Celaya, están sobreexplotados, con déficits anuales de 27,9 y 156,5 hm<sup>3</sup> respectivamente (CONAGUA, 2024; DOF, 2023a; CONAGUA, 2022; IPLANEG, 2019; SEMARNAT, 2018).

En muchos países las tarifas del agua para el sector agrícola son más bajas que las de los sectores doméstico e industrial, lo que resulta en una subvaloración del recurso y solo cubre parcialmente los costos operativos y de infraestructura (OCDE, 2013). Como resultado, las tarifas en el sector agrícola no reflejan el verdadero valor del recurso, ni siguen completamente los principios de la teoría económica, lo que contribuye a su uso ineficiente (Young, 2005).

Aunque la Ley de Aguas Nacionales en México (DOF, 2023b) establece el cobro por el exceso de agua utilizada en la agricultura, las tarifas representan apenas una fracción de las vigentes en otros sectores económicos. Esto refleja una gestión deficiente y una falta de consideración de la escasez y del grado de presión hídrica, particularmente en las regiones centro, norte y noroeste del país (CONAGUA, 2023).

Adicionalmente, el bajo nivel de recuperación de los costos de riego se refleja en que, en el año 2020, los ingresos por derechos de riego constituyeron menos del 2% del total recaudado por la Comisión Nacional del Agua por derechos, aprovechamientos y otros conceptos, y la recaudación específica por derechos de uso agrícola apenas alcanzó el 0,02% de los ingresos totales por aprovechamiento de aguas nacionales, cifras claramente insuficientes para cubrir los costos operativos del suministro de agua (CEDRSSA, 2021).

El DR011, es el de mayor extensión y de mayor volumen de agua concesionado en la cuenca Lerma-Chapala (CONAGUA, 2021; Levine, 2007). Además, presenta una eficiencia global en el uso del agua de apenas el 48% (Ángeles, 2015), acentuada por el aumento de usuarios y por extracciones insostenibles (Flores-Casamayor et al., 2020). Estas dinámicas han generado dificultades en la distribución del recurso, afectando la sostenibilidad de la región (Peniche-Camps, 2020), comprometiendo la viabilidad económica de pilares productivos como los Módulos de Riego Salvatierra y Cortazar.

La escasez de agua observada en los últimos ciclos ha limitado la producción y los ingresos de los agricultores, así como el bienestar de la población dependiente de la agricultura (Peniche-Camps, 2020; Rodríguez-Flores et al., 2019). Los informes del DR011 muestran que, respecto al ciclo agrícola 2018-2019, la disponibilidad de agua superficial cayó un 11% en 2019-2020 y un 61% en 2020-2021, con reducciones de la superficie cultivada del 6% y del 24%, respectivamente, derivado de que los productores limitaron la siembra a un solo ciclo.

Dentro de las herramientas teóricas para evaluar la productividad del agua, el precio sombra constituye un indicador central. Obtenido como el valor dual de la restricción hídrica en modelos de optimización, representa la valoración económica marginal del recurso (Young y Loomis, 2014; Norton y Hazell, 1986). Conceptualmente, el precio sombra equivale al incremento en el beneficio total del sistema productivo al disponer de una unidad adicional de agua y refleja el costo de oportunidad asociado a su uso actual, especialmente cuando las tarifas agrícolas no internalizan la escasez (Ward y Pulido-Velazquez, 2008; Young, 2005); por ello, estimar y verificar empíricamente estos valores es esencial para diseñar tarifas y medidas de asignación que incentiven usos más eficientes.

Si bien trabajos previos han aplicado programación matemática en el DR011 (Botello-Aguillón et al., 2022; Rodríguez-Flores et al., 2019; Ramírez-Barraza et al., 2019; Florencio-Cruz et al., 2002) y en otras regiones como en el DR 003 Tula, Hidalgo (Hernández-Pérez et al., 2025), persiste incertidumbre sobre cómo reducciones progresivas en la disponibilidad hídrica afectan asignaciones, ingresos y el precio sombra del agua. Este estudio contribuye estimando precios sombra y analizando su comportamiento mediante análisis de sensibilidad local y escenarios contrafactuales de escasez, con el fin de ofrecer evidencia operativa útil para la gestión y la definición de políticas tarifarias.

La Pregunta de investigación que orienta el estudio es ¿Cómo afectan reducciones progresivas en la disponibilidad de agua la asignación de cultivos, los ingresos agrícolas y la productividad económica del agua en los módulos Salvatierra y Cortazar del DR011 durante el ciclo 2021–2022?

El objetivo fue analizar el impacto económico de reducciones progresivas en la disponibilidad de agua sobre la asignación óptima de cultivos y estimar la productividad del agua en los módulos Salvatierra y Cortazar durante el ciclo agrícola 2021–2022. Se plantea la hipótesis de que, ante reducciones progresivas en la disponibilidad hídrica, los precios sombra aumentarán significativamente y las asignaciones óptimas de superficie y los ingresos totales se modificarán de forma cuantificable; los precios sombra estimados constituyen la evidencia empírica para contrastar dicha hipótesis.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio es un ejercicio cuantitativo de modelación económica-optimización entendida como un enfoque que combina principios de la teoría microeconómica con técnicas de programación matemática para representar decisiones productivas bajo restricciones progresivas en la disponibilidad hídrica, que modifican el patrón de cultivos, los ingresos agrícolas y la productividad del agua en dos módulos representativos del DR011. En este contexto, la modelación permite simular el comportamiento de los productores agrícolas, quienes asignan tierra y agua entre distintos cultivos con el objetivo de maximizar el beneficio económico neto. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios de asignación eficiente del agua en distritos de riego y cuencas agrícolas, al permitir integrar criterios económicos y físicos en contextos de escasez hídrica.

La formulación maximiza el beneficio neto total y combina la solución óptima con análisis de sensibilidad local. Para responder la pregunta de investigación, el modelo y los escenarios permiten cuantificar asignaciones de agua y precios sombra que aportan la evidencia empírica para contrastar la hipótesis, mientras que el análisis de sensibilidad local documenta la validez puntual de los duales en cada ejecución y detecta puntos de quiebre relevantes para la interpretación de resultados.

### **Área de estudio**

Dentro de la Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico se ubica el DR011 Alto Río Lerma que emplea agua superficial que proviene del sistema de presas Tepuxtepec-Solís, la Laguna

de Yuriria y Presa La Purísima, además de 2 173 pozos (IPLANEG, 2019). El análisis se centra en dos módulos de este distrito, Salvatierra (M02) y Cortazar (M05) La codificación corresponde a la designación oficial utilizada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para estas subdivisiones administrativas en los distritos de riego, denominadas módulos, que agrupan unidades de riego con infraestructura y gestión operativa común y sirven como unidad administrativa para la planificación y seguimiento del suministro hídrico. La administración local de cada módulo recae en las Asociaciones de Usuarios del Agua. Su consideración permite analizar heterogeneidades en infraestructura, disponibilidad de agua y aspectos productivos, lo que hace a los módulos particularmente sensibles a las ineficiencias del sistema (Figura 1).

Estos módulos fueron seleccionados por su relevancia económica regional, la disponibilidad de datos para el ciclo 2021–2022, y por su representatividad en términos de superficie cultivada y demanda de agua; en conjunto representan el 26% de la demanda total de agua que abastecen el 38% de la superficie de riego sembrada y corresponden al 26% de los usuarios del distrito, así como por su heterogeneidad productiva, que permite evaluar la sensibilidad de asignaciones frente a restricciones hídricas, equivalentes a escenarios de sequía.

### **Datos y fuentes**

Los datos proporcionados por personal del DR011 constituyen los principales parámetros de entrada del modelo, correspondientes al ciclo agrícola 2021–2022 (Tabla 1), e incluyen patrón de cultivos, superficies sembradas (ha), volúmenes de agua asignados por cultivo diferenciando agua superficial y subterránea ( $\text{dam}^3/\text{ha}$ ), rendimientos (ton/ha), precios medios rurales (\$/ton) y costos de producción (\$/ton). Para contextualizar los escenarios se empleó la serie histórica de disponibilidad hídrica de la CONAGUA de 1999–2000 a 2021–2022 (Tabla 2). Los precios netos empleados en la función objetivo se calcularon por cultivo como el ingreso bruto menos los costos de producción, excluyendo la cuota de agua, la cual se trató como un parámetro exógeno en el modelo.

Los cultivos incluidos en el modelo abarcan más del 95% de la superficie sembrada en el ciclo 2021-2022 y se agrupan en cuatro categorías: otoño-invierno (OI), primavera-verano (PV), perennes (PRN) y segundos cultivos (2C). En total, se consideraron 17 cultivos que el modelo considera como actividades para el módulo Salvatierra y 14 para el módulo Cortazar, como se detalla en la Tabla 1.

### **Modelo teórico**

El modelo teórico que sustenta este estudio se basa en el enfoque de optimización económica para la asignación eficiente de recursos agrícolas bajo restricciones, propuesto originalmente por Norton y Hazell (1986). Este marco formaliza un problema de programación matemática que integra restricciones físicas (tierra y agua) con criterios económicos (precios, costos y beneficios), permitiendo estimar asignaciones óptimas y valores duales (precios sombra) del recurso hídrico. La metodología ha mostrado amplia

aplicabilidad en estudios recientes sobre asignación de agua y evaluación de impactos de sequía, entre ellos Rodríguez-Flores et al. (2019), Martínez-Luna et al. (2021) y Botello-Aguillón et al. (2022), que emplean modelos de programación o calibrados para analizar cómo la escasez altera patrones de cultivo, ingresos y el valor marginal del agua. Estas aplicaciones avalan la idoneidad del enfoque para el objetivo de este trabajo y subrayan su utilidad para diseñar estrategias y políticas orientadas a mejorar la productividad del agua y la sostenibilidad agrícola en contextos de restricción hídrica.

En esta investigación, el planteamiento de Norton y Hazell (1986) se adopta como marco conceptual, mientras que su operacionalización se realiza mediante un modelo de programación lineal, que representa explícitamente las decisiones de siembra y uso de agua en los módulos de riego analizados. De esta forma, el modelo permite evaluar cómo variaciones en la disponibilidad hídrica modifican el patrón de cultivos, los ingresos agrícolas y la productividad del agua.

Matemáticamente, el problema se formula como la maximización del beneficio neto agrícola total:

- i. La función objetivo  $Z$  maximiza los beneficios netos que resultan del producto de las hectáreas sembradas, por los precios netos de cada cultivo:

$$Z = \sum_{j=1}^n C_j X_{j,k} \quad (1)$$

- ii. Sujeto a restricciones de disponibilidad de tierra, agua superficial y subterránea, incorporadas mediante la matriz de coeficientes técnicos, que representan la cantidad de recursos necesarios para producir una unidad del  $j$ -ésimo cultivo, y una cantidad máxima disponible para cada recurso expresados en hectáreas de tierra y  $\text{dam}^3$  de agua. Las unidades de  $C_j$  se expresan en  $\$/\text{ha}$  y de  $a_{ij}$  en  $\text{dam}^3/\text{ha}$ .

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j \leq b_i \quad (2)$$

- iii. Además, se aplican condiciones de no negatividad para las variables de decisión:

$$X_j \geq 0 \quad (3)$$

Esta formulación permite obtener la asignación óptima de superficies y volúmenes de agua que maximizan el ingreso agrícola bajo distintos escenarios de disponibilidad hídrica, así como los precios sombra (valores duales) asociados al recurso agua.

## Diseño del modelo

Se emplea un modelo de programación lineal determinística para maximizar el beneficio neto total ( $Z$ ), donde las variables de decisión  $X_j$  representan las hectáreas sembradas, y  $C_j$  es el precio neto por cultivo en \$/ha. El modelo incorpora restricciones de disponibilidad de tierra mensual por módulo, y de agua diferenciada por fuente superficial y subterránea, así como por ciclo OI y PV. Las restricciones hídricas se implementan mediante una matriz de coeficientes técnicos (en  $\text{dam}^3/\text{ha}$ , que se obtienen directamente de la relación entre agua total suministrada y superficie sembrada. Se advierte que el volumen de agua se expresa en  $\text{dam}^3$ , pero también en su equivalente en  $\text{m}^3$  con fines comparativos con las tarifas públicas ( $1 \text{ dam}^3 = 1\,000 \text{ m}^3$ ). Adicionalmente, debido a condiciones de mercado, se estableció un límite máximo para hortalizas, solo permite un incremento del 30% en la superficie sembrada respecto al ciclo 2021-2022.

El modelo asume tecnologías lineales por hectárea, precios exógenos, competencia perfecta y ausencia de externalidades de mercado. Asimismo, considera disponibilidades específicas de agua superficial y subterránea por módulo y ciclo agrícola, sin permitir intercambios entre módulos, pero sí una redistribución interna entre cultivos y dejar tierra en descanso cuando las restricciones lo requieren.

El modelo se implementó y resolvió utilizando el software LINDO 6.1 (Linear, Interactive, and Discrete Optimizer), una herramienta especializada ampliamente utilizada en investigación de operaciones diseñado para resolver problemas de optimización lineal. Su elección se debió a su eficiencia y precisión en el manejo de modelos con múltiples actividades y múltiples restricciones. Primero se ejecutó el escenario base con las dotaciones de 2021-2022 para determinar la asignación óptima de recursos. Posteriormente, y con base en el historial mostrado en la Tabla 2, se simularon cinco escenarios contrafactuales de sequía progresiva: MS10 (-10%), MS20 (-20%), MS30 (-30%), MS40 (-40%) y MS50 (-50%). Cada ejecución generó vectores de solución de ingresos, así como los valores duales asociados a las restricciones hídricas.

La definición de los escenarios de sequía se apoya en la clasificación empleada por el Banco de México (2022), basada en la clasificación del Monitor de Sequía de América del Norte que establece que una sequía moderada (D1) implica una disminución del 10–20% en la oferta hídrica; una severa (D2), del 20–30%; una extrema (D3), del 30–40%; y una excepcional (D4), del 50% o mayor. La pertinencia de estos escenarios en el DR011 se justifica por su alta variabilidad histórica; por ejemplo, en 2020-2021, la disponibilidad de agua superficial reportada por CONAGUA (2025) fue de 258 157  $\text{dam}^3$ , apenas un 35% del volumen del ciclo siguiente, lo que equivale a una caída del 65% que provocó una reducción de hasta el 24% en la superficie cultivada.

Para evaluar la estabilidad local de las soluciones se utilizaron las salidas de sensibilidad que LINDO 6.1 genera. Específicamente, se revisaron los parámetros *allowable increase* y *allowable decrease* para cada restricción, con el propósito de identificar los intervalos de perturbación de las dotaciones y coeficientes en los que la base óptima permanece sin

cambios y, por tanto, los precios sombra son válidos sin reoptimizar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este apartado presenta un análisis integral de los efectos de la escasez de agua, contextualizado en las condiciones tecnológicas y de mercado del ciclo 2021-2022. Se comparó un escenario base, que representó una asignación eficiente de los recursos, con cinco escenarios de sequía que redujeron gradualmente la disponibilidad de agua y reprodujeron la variabilidad histórica de la zona. Se evaluaron los efectos agregados sobre ingresos, superficie sembrada, cambios en los patrones de cultivo y producción. Además, se analizó la productividad del agua mediante la interpretación de su precio sombra, el cual permitió cuantificar el impacto económico de distintos grados de escasez. El apartado se complementó con un análisis de sensibilidad local para explicar cambios estructurales entre escenarios.

### *Efectos de la escasez de agua*

La comparación entre los escenarios de sequía reveló efectos económicos y productivos importantes. En comparación con el ciclo 2021-2022, la solución del modelo base mostró un incremento promedio potencial del 31% en los ingresos netos agregados de los productores en los módulos analizados, lo que indicó el beneficio de una reasignación eficiente de los recursos. Sin embargo, ante disminuciones **hídricas** progresivas, tanto los ingresos como la superficie sembrada disminuyeron de forma pronunciada (Tabla 3). En el escenario más severo (MS50), la reducción acumulada de ingresos alcanzó los \$951 millones, equivalente a una contracción del 40% respecto al modelo base. Esta disminución en los ingresos fue una consecuencia directa de la reasignación del agua y del incremento de tierra en descanso forzoso. Bajo una sequía del 50%, el 44% de la superficie del escenario base, dejó de cultivarse.

Los impactos fueron heterogéneos por módulo; los escenarios de sequía revelaron reducciones sustanciales tanto en los ingresos como en la superficie sembrada, con implicaciones directas en el bienestar de los productores. En el módulo Salvatierra, el escenario base mostró un incremento de ingresos del 38% respecto al ciclo 2021-2022; en Cortazar, el aumento fue de 25%. En conjunto, ambos módulos presentaron \$547 millones adicionales (Tabla 3).

Al comparar el escenario base con los cinco escenarios de sequía, una disminución del 10% en la disponibilidad de agua condujo a una reducción de ingresos del 7% en Salvatierra y del 6% en Cortazar. En el escenario MS50, los ingresos se contrajeron en 43% en Salvatierra y 38% en Cortazar. De manera análoga, la superficie sembrada disminuyó progresivamente en ambos módulos a medida que se restringió el suministro hídrico, alcanzando una reducción en el escenario MS50 de 47% en Salvatierra y de 41% en Cortazar, respecto al modelo base.

De lo anterior se desprende que, si bien el módulo Salvatierra registró en el modelo base

un incremento notable tanto en ingresos como en superficie cultivada, fue también el módulo que más se afectó en los escenarios de sequía. Como se observa en la Tabla 3 y la Figura 2, ambos módulos experimentaron reducciones significativas; sin embargo, el impacto fue proporcionalmente mayor en Salvatierra, donde las caídas en ingresos y superficie superaron las registradas en Cortazar conforme se agudizó la escasez hídrica. Esto sugiere una mayor sensibilidad del módulo Salvatierra a las restricciones en el recurso agua, asociada a su estructura productiva y a la dependencia relativa del riego.

Estos resultados demostraron el significativo impacto que provoca la sequía en los sistemas de producción agrícola. La disminución en los ingresos en ambos módulos fue relevante y coinciden parcialmente con lo obtenido por Florencio-Cruz et al. (2002), quienes reportaron una reducción máxima del 9% en ingresos netos y del 19% en superficie sembrada, ello como consecuencia de una disminución del 18% al 24% en la disponibilidad de agua.

Los resultados coinciden con estudios previos que destacan cómo la optimización de patrones de cultivo mejora significativamente los ingresos agrícolas. Botello-Aguillón et al. (2022) reportaron un incremento del 10% en módulos del DR011; Martínez-Luna et al. (2021) registraron un incremento del 22% al optimizar cultivos en el DR100; Zetina-Espinosa et al. (2013) identificaron más del 20% en el DR044; Ortega-Gaucin et al. (2008) documentaron un 7% en el DR05; y Godínez-Montoya et al. (2007) reportaron un aumento del 17% en la Comarca Lagunera.

### ***Cambios en los patrones de cultivo***

La optimización modificó la distribución de cultivos para maximizar el beneficio neto por unidad de agua. En ambos módulos el ajuste privilegió cultivos con mayor productividad económica hídrica, manteniendo al maíz y al trigo como cultivos dominantes, aunque su participación relativa se ajustó conforme se intensificó la restricción evidenciando la sensibilidad del patrón productivo ante variaciones en la dotación.

En Salvatierra, el maíz y el trigo aumentaron su participación en el escenario base optimizado, pero fueron también los cultivos que perdieron **más superficie absoluta** al intensificarse la escasez, lo que indicó una mayor vulnerabilidad del módulo asociada a su estructura productiva concentrada en cultivos extensivos, mientras que cultivos como tomate y zanahoria mantuvieron áreas relativamente estables, en tanto que, cebada, frijol, avena, sorgo y alfalfa dejaron de sembrarse en escenarios de restricción severa. Este comportamiento coincide con lo señalado por Rodríguez-Flores et al. (2019) y Martínez-Luna et al. (2021), quienes documentan que, ante escasez hídrica, los modelos de optimización reasignan superficie hacia cultivos con mayor rentabilidad por unidad de agua.

En Cortazar, la optimización favoreció un mayor uso relativo de sorgo y mantuvo cierta estabilidad de la superficie sembrada de maíz 2C, sorgo 2C y espárrago ante las reducciones progresivas en la disponibilidad de agua; en cambio, el trigo experimentó

una notable contracción, en tanto que la cebada y alfalfa que demandan más agua o que tienen menor rendimiento económico por unidad de agua desaparecieron de las soluciones óptimas en los escenarios de sequías más severas. Resultados similares han sido reportados por Botello-Aguillón et al. (2022), quienes identifican ajustes en la composición de cultivos asociados al aumento del valor marginal del agua. En conjunto, los resultados muestran que la escasez no solo eleva el precio sombra, sino que induce una reconfiguración estructural del patrón productivo.

Estas modificaciones en superficie se tradujeron en cambios cuantificables en la composición del ingreso agrícola. En Cortazar, cultivos como lechuga y espárrago mantuvieron aportes relevantes del 19% del ingreso del módulo en escenarios menos restrictivos (Tabla 4), lo que evidencia que la estabilidad relativa en superficie también sostuvo su contribución económica. Así, la reasignación óptima no solo respondió a criterios físicos de disponibilidad, sino también a la maximización del ingreso bajo restricciones crecientes.

### **Productividad del agua**

Los precios sombra del agua, extraídos de LINDO 6.1, representan el valor del producto marginal de un recurso (Norton y Hazell, 1986). Asociado a la restricción de agua, expresa el incremento marginal en la función objetivo que obtendría el sistema productivo al disponer de una unidad adicional de agua. Este valor orienta sobre el costo económico de la escasez y el margen máximo eficiente para pagar por mayor disponibilidad de agua. Estos precios se expresan en pesos por decámetro cúbico y se convirtieron a pesos por metro cúbico para compararlos con tarifas **públicas** ( $1 \text{ dam}^3 = 1\,000 \text{ m}^3$ ).

En la Tabla 5, se observa que los precios sombra aumentaron conforme disminuyó la disponibilidad de agua, y que variaron según la fuente hídrica y el ciclo agrícola. En términos de política, la brecha entre los precios sombra estimados y las tarifas agrícolas vigentes fue relevante. Por ejemplo, en Salvatierra el precio sombra del agua superficial en el escenario base para OI se reportó en \$2 200 por  $\text{dam}^3$  (equivalente a \$2,20 por  $\text{m}^3$ ) y, en escenarios extremos se aproximó a \$4 200 por  $\text{dam}^3$ ; en tanto que, en PV los valores fueron **más altos**, con un rango de \$10 100 a \$17 100 por  $\text{dam}^3$  para agua superficial. Estas estimaciones superaron ampliamente la tarifa pagada de \$215 por  $\text{dam}^3$ , lo que indicó una subvaloración del recurso en la tarificación actual y sugirió el diseño de instrumentos que internalicen, al menos parcialmente, el costo de oportunidad del agua.

En Cortazar, el precio sombra del agua superficial permaneció estable en los escenarios del ciclo OI, pero aumentaron 50% en el ciclo PV a partir de disminución en la disponibilidad del 20%. Para agua subterránea se observó un incremento pronunciado de más de siete veces en el ciclo OI y del 13% en el ciclo PV, evidenciando la creciente presión sobre los acuíferos en periodos críticos.

El análisis mostró que el precio efectivamente pagado por los agricultores en el DR011 (\$0,22 por  $\text{m}^3$ ) se encuentra significativamente por debajo de los precios sombra

estimados en este estudio, lo que evidencia una subvaloración del recurso y puede perpetuar ineficiencias en la asignación del agua, además de incentivar su sobreuso.

Estudios previos han demostrado que el precio efectivamente pagado por los agricultores es inferior al valor económico marginal del agua. Florencio-Cruz et al. (2002) identificaron precios sombra en el DR011 de \$0,54 a \$2,28 por m<sup>3</sup> para agua superficial, y de \$0,66 a \$6,85 por m<sup>3</sup> para agua subterránea, con máximos de hasta \$152 por m<sup>3</sup> bajo determinadas condiciones de restricción.

Otros estudios realizados en otras regiones y en diferentes distritos confirmaron esta misma tendencia. Godínez-Montoya et al. (2007) estimaron precios sombra de \$0,58 por m<sup>3</sup> para agua superficial y \$0,65 por m<sup>3</sup> para agua subterránea en la Comarca Lagunera; Rubiños-Panta (2007) reportó rangos de \$0,17 a \$0,28 por m<sup>3</sup> en los DR011 y DR017, respectivamente; mientras que Zetina-Espinosa et al. (2013) identificaron un rango más amplio, de \$0,03 a \$5,72 por m<sup>3</sup> en el DR044.

Más recientemente, Rodríguez-Flores et al. (2019) reportaron valores de \$0,27 a \$0,70 por m<sup>3</sup>, mientras que Ramírez-Barraza et al. (2019) calcularon precios sombra de \$0,91 por m<sup>3</sup> para agua superficial y \$1,56 por m<sup>3</sup> para subterránea en la Comarca Lagunera. Asimismo, Martínez-Luna et al. (2021) estimaron un precio sombra de \$1,44 por m<sup>3</sup> en el DR100, y Botello-Aguillón et al. (2022) registraron valores de \$3,90 por m<sup>3</sup> en dos módulos del DR011. En conjunto, estos resultados refuerzan la necesidad de revisar las estructuras tarifarias, a fin de que el precio del agua refleje de manera más precisa su valor económico y promueva un uso más eficiente y sostenible del recurso.

### **Análisis de sensibilidad**

Para evaluar la robustez puntual de las soluciones y de los precios sombra se realizó un análisis de sensibilidad local sobre las restricciones de disponibilidad hídrica. En cada escenario se extrajeron los valores duales asociados a las restricciones de agua y los rangos de estabilidad del lado derecho (RHS ranges: *allowable increase* y *allowable decrease*) generados por LINDO. Estos rangos indican el intervalo de variación de la dotación hídrica dentro del cual la base óptima permanece inalterada y, por tanto, el precio sombra conserva su validez local.

En la Tabla 6 se muestran la dotación actual, los intervalos de estabilidad (RHS ranges) y los límites inferior y superior de cada restricción, todos extraídos de las salidas de LINDO. Todas las restricciones registraron slack igual a cero y, por tanto, se consideraron activas. La Figura 3 sintetiza los valores de la Tabla 5 y facilita la comparación gráfica de la evolución de los precios sombra por escenario y módulo.

En las ejecuciones comparadas se observaron discontinuidades en los valores duales entre escenarios; estas discontinuidades se explican por cambios en la base óptima (por la sustitución de restricciones activas al cruzar los *RH ranges*), un comportamiento esperado en problemas de programación lineal. La lectura de dichos rangos permitió

identificar los niveles de dotación en los que ocurren puntos de quiebre en los precios sombra y en la estructura de asignación óptima del agua.

Estos umbrales son clave para valorar la robustez puntual de cada precio sombra y para diseñar recomendaciones operativas: intervenciones tarifarias o de asignación que actúen cerca de esos límites podrían producir cambios estructurales en la asignación de cultivos y en el valor económico marginal del agua. Los resultados muestran, además que los módulos difieren en su sensibilidad ante reducciones equivalentes de dotación, lo que apoya la necesidad de estrategias de manejo hídrico diferenciadas.

Por ejemplo, para la restricción Salvatierra-Superficial OI en el escenario Base, LINDO reporta RHS de 13 437 dam<sup>3</sup>. Es decir, la restricción tolera una reducción de hasta menos 1 755 dam<sup>3</sup> antes de cambiar la base óptima, pero solo admite un pequeño aumento de 3,8 dam<sup>3</sup> sin alterar la base. Esta asimetría explica por qué recortes pequeños en una dirección pueden provocar saltos en los precios sombra.

El modelo de programación lineal asignó el agua entre cultivos de forma consistente con el objetivo de maximizar el beneficio neto; las soluciones obtenidas y la lectura de los rangos de sensibilidad respaldaron la hipótesis planteada: los precios sombra aumentaron con la restricción hídrica y las asignaciones óptimas de superficie e ingresos se modificaron de manera cuantificable. Los patrones y magnitudes del cambio variaron por módulo, lo que justifica políticas diferenciadas y medidas de manejo adaptadas a las condiciones productivas locales.

Resultados similares en términos de precios sombra y cambios en patrones de cultivo han sido reportados en investigaciones que aplican modelos de optimización para evaluar la asignación de agua bajo escasez (Rodríguez-Flores et al., 2019; Martínez-Luna et al., 2021). Aunque dichos trabajos coinciden en la dirección de los efectos (reasignación de cultivos y aumento del valor marginal del agua), no documentan formalmente el análisis de *RHS ranges* para los duales como el presente; por ello, el análisis de sensibilidad local aquí implementado amplía la evidencia disponible al identificar intervalos de estabilidad y puntos de quiebre útiles para la formulación de políticas tarifarias y de gestión operativa del recurso.

## CONCLUSIONES

La sequía afecta significativamente la agricultura en los módulos Salvatierra y Cortazar del DR011 reduciendo los ingresos agrícolas y, en consecuencia, la superficie sembrada, además de modificar la composición del patrón de cultivos. La escasez progresiva de agua limita la capacidad de los agricultores para mantener sus áreas de cultivo, lo que los lleva a reducir la superficie sembrada como medida de adaptación, mitigando pérdidas económicas mayores, pero implicando una disminución de la producción agregada. La aplicación de modelos de asignación eficiente revela el potencial de incrementar, tanto la superficie cultivada, como los ingresos totales mediante una reasignación que prioriza cultivos de mayor rentabilidad por unidad de agua, sin embargo, esos beneficios se

erosionan conforme se intensifica la escasez.

Una contribución central del trabajo es la estimación de precios sombra que superan ampliamente las tarifas agrícolas, evidenciando que existe una subvaloración sistemática del costo del agua en la tarificación vigente, que no refleja la presión real sobre el recurso, y sugiere la necesidad de incorporar instrumentos que internalicen, al menos parcialmente, el costo de oportunidad del recurso. La incorporación de referencias basadas en los precios sombra en el diseño de políticas tarifarias y de asignación podría incentivar usos más eficientes, reducir presiones sobre acuíferos y orientar programas de reconversión hacia cultivos con mayor productividad económica del agua.

Los resultados responden a la pregunta de investigación y cumplen el objetivo propuesto al ofrecer estimaciones comparadas entre el escenario base y los escenarios de escasez, proporcionando la evidencia empírica necesaria para evaluar impactos en asignaciones, ingreso y productividad del agua. Asimismo, la hipótesis queda corroborada: los precios sombra aumentan conforme disminuye la disponibilidad hídrica y las asignaciones óptimas de superficie e ingresos se modifican de manera cuantificable. Los rangos de sensibilidad permitieron además identificar puntos de quiebre en la estructura de soluciones, información relevante que puede orientar la revisión de tarifas, priorizar inversiones en eficiencia y definir incentivos para una reasignación de cultivos que fortalezca la resiliencia y sostenibilidad de la agricultura regional en contextos de escasez

Entre las limitaciones, se reconoce que el análisis se apoya en datos agregados del ciclo 2021–2022 y no captura variabilidad parcelaria, dinámicas interanuales de precios ni efectos distributivos entre usuarios o repercusiones sobre empleo agrícola. Para fortalecer las implicaciones de política se sugiere que estudios futuros integren datos a nivel parcela y análisis intertemporales que consideren la volatilidad de precios y respuestas de mercado, con el fin de evaluar la sostenibilidad y resiliencia de las estrategias de asignación bajo condiciones más realistas.

## APÉNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

**Tabla 1.**

*Patrón de cultivos, disponibilidad de agua, rendimiento, costos de producción y precios netos del ciclo 2021-2022*

Cultivos Salvatierra	Superficie sembrada (ha)	Agua superficial (dam <sup>3</sup> )	Agua subterránea (dam <sup>3</sup> )	Rend. (ton ha <sup>-1</sup> )	Prod. (ton)	Precio medio rural (\$ton <sup>-1</sup> )	Precio Neto (\$ha <sup>-1</sup> )	Costos de prod. (\$ha <sup>-1</sup> )
Cebada OI	228	1 425	443	7	1 599	7 800	21 762	32 942
Trigo OI	2 289	8 214	7 906	7	16 427	9 000	29 371	35 219
Brócoli OI	51	0	248	19	966	5 000	35 000	60 000
Frijol OI	548	3 407	1 838	2	1 095	17 185	953	33 417
Avena OI	71	259	99	13	953	2 100	6 567	21 778
Tomate OI	331	1 723	1 225	26	8 688	7 755	166 478	37 256

Zanahoria OI	613	843	3 362	46	28 284	1 327	28 589	32 588
Maíz PV	5 839	22 590	8 128	13	78 243	7 500	55 733	44 768
Sorgo PV	73	361	0	8	586	7 300	29 300	29 100
Frijol PV	263	974	759	2	494	17 332	3 583	29 001
Avena PV	4	0	9	14	52	2 100	8 391	21 009
Tomate PV	201	635	403	28	5 633	7 227	173 319	29 038
Zanahoria PV	83	74	221	46	3 819	1 600	40 802	32 692
Alfalfa PRN	1 094	3 733	2 880	15	16 265	3 549	24 674	28 088
Maíz 2C	2 444	5 912	2 664	13	31 041	7 500	51 750	43 500
Sorgo 2C	25	69	0	8	201	7 300	29 300	29 100
Frijol 2C	25	40	23	2	49	17 500	3 000	32 000
<b>Subtotal</b>	<b>14 181</b>	<b>50 258</b>	<b>30 209</b>					
<b>Cultivos Cortazar</b>								
Cebada OI	562	2 221	3 299	7	3 940	7 800	21 762	32 942
Trigo OI	6 779	43 290	15 594	7	48 651	9 000	29 371	35 219
Brócoli OI	269	0	2 028	19	5 112	5 000	35 000	60 000
Lechuga OI	658	5	4 573	28	18 107	6 632	143 170	39 196
Maíz PV	4 700	9 411	9 111	13	62 976	7 500	55 733	44 768
Sorgo PV	152	448	36	9	1 368	7 300	36 600	29 100
Cebada PV	44	0	421	7	310	7 800	21 762	32 942
Trigo PV	446	0	2 692	7	3,204	9 000	29 371	35 219
Lechuga PV	92	0	327	30	2 712	4 208	84 940	39 196
Alfalfa PRN	545	888	1 653	25	13 366	3 549	58 934	28 088
Espárrago PRN	954	29	1 836	5	4 769	43 058	130 473	84 815
Maíz 2C	5 669	8 897	8 145	13	70 863	7 500	50 250	43 500
Sorgo 2C	3 105	5 009	2 230	10	30 089	7 300	41 637	29 100
Lechuga 2C	19	0	55	26	498	6 134	122 742	39 196
<b>Subtotal</b>	<b>23 995</b>	<b>70 197</b>	<b>52 000</b>					

Fuente: Elaboración propia con información del DR011.

**Tabla 2.***Disponibilidad de agua en dam<sup>3</sup> por tipo de fuente respecto a 2021-2022*

Año agrícola	Superficial	%	Subterránea	%	Total	%
2000-2001	298 584	41	383 158	103	681 742	62
2009-2010	351 603	48	379 818	102	731 421	66
2012-2013	345 880	47	370 905	100	716 785	65
2020- 2021	258 157	35	388 190	104	646 347	59
2021-2022	729 745	100	372 564	100	1102 309	100
Promedio 2000-2022	634 678		349 893		1001 702	

Fuente: elaboración propia con datos de CONAGUA (2025).

**Tabla 3.***Ingresos y superficie en escenarios de sequía*

Modelo	Salvatierra				Cortazar			
	Ingresos (MDP)†	% ‡	Superficie (ha)	% ‡	Ingresos (MDP)†	% ‡	Superficie (ha)	% ‡
2021-2022	669		14 181		1,177		23 995	
Base	921	37,80	17 401	22,70	1,472	25,00	27 016	12,60
MS10	858	-6,90	16 063	-7,70	1,387	-5,80	25 453	-5,80
MS20	790	-14,30	14 720	-15,40	1,275	-13,30	23 235	-14,00
MS30	705	-23,50	12 926	-25,70	1,155	-21,50	20 774	-23,10
MS40	616	-33,20	11 035	-36,60	1,035	-29,70	18 341	-32,10
MS50	527	-42,80	9 145	-47,40	915	-37,80	15 893	-41,20

† MDP millones de pesos,

‡ Porcentaje de variación

Fuente. Elaboración propia con información del DR011

**Tabla 4.***Cambios en la participación de los cultivos en la superficie sembrada considerando distintos escenarios de sequía*

Salvatierra (ha sembrada)	21-22	Base	MS10	MS20	MS30	MS40	MS50
Trigo OI	2 289	2 939	2 569	2 516	2 177	1 784	1392
Tomate OI	331	450	450	450	450	450	450
Zanahoria OI	613	395	385	149	108	100	93
Maíz PV	5 839	2 730	1 585	238	0	0	0
Tomate PV	201	290	290	290	290	290	290
Maíz 2C	2 444	10 397	10 778	11 066	9 899	8 409	6 919
Cortazar (ha sembrada)							
Trigo OI	6 779	2 149	538	0	0	0	0
Lechuga OC	658	856	856	856	856	856	856
Maíz PV	4 700	13 365	10 748	9 078	8 150	7 220	6 291
Sorgo PV	152	2 758	3 149	3 409	4 410	5 428	6 438

Espárrago PR	954	1 240	1 240	1 240	1 240	1 240	1 240
Sorgo 2C	3 105	6 607	8 833	8 652	6 116	3 597	1 068

**Fuente.** Elaboración propia con información del DR011 y resultados de los modelos

**Tabla 5.**

*Precio sombra del agua en escenarios de sequía en \$m<sup>3</sup>*

Módulo y Ciclo	Base	MS10	MS20	MS30	MS40	MS50
Salvatierra Superficial OI	2,20	2,20	2,20	4,20	4,20	4,20
Salvatierra Subterránea OI	2,10	2,10	2,10	4,20	4,20	4,20
Salvatierra Superficial PV	10,10	10,10	10,10	17,10	17,10	17,10
Salvatierra Subterránea PV	12,00	11,90	11,90	9,60	9,60	9,6
Cortazar Superficial OI	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30	4,30
Cortazar Subterránea OI	0,80	0,80	6,30	6,30	6,30	6,30
Cortazar Superficial PV	7,30	7,40	11,00	11,00	11,00	11,00
Cortazar Subterránea PV	15,40	15,40	17,40	17,40	17,40	17,40

**Fuente.** Elaboración propia con información del DR011 y resultados de los modelos.

**Tabla 6.**

*Análisis de sensibilidad y clasificación de estabilidad por módulo y escenario.*

Esce- nario	Módulo y Ciclo	RHS actual (dam <sup>3</sup> )	Incremento permisible (dam <sup>3</sup> )	Decremento permisible (dam <sup>3</sup> )	Límite inferior (RHS - decre- mento)	Límite superior (RHS + incre- mento)	Clasifi- cación de Estabili- dad	Activa
Base	M02 Sup OI	13 438	4	1 755	11 682	13 441	Moderada	Si
Base	M02 Sub OI	13 969	3	1 644	12 325	13 973	Moderada	Si
Base	M02 Sup PV	36 821	1 303	0	36 821	38 124	Sensible	Si
Base	M02 Sub PV	16 240	0	468	15 772	16 240	Sensible	Si
MS10	M02 Sup OI	12 094	1 666	514	11 580	13 760	Moderada	Si
MS10	M02 Sub OI	12 640	1 730	470	12 170	14 369	Moderada	Si
MS10	M02 Sup PV	33 139	43	1 266	31 873	33 182	Sensible	Si
MS10	M02 Sub PV	14 549	455	15	14 533	15 003	Sensible	Si
MS20	M02 Sup OI	11 581	646	830	10 751	12 227	Moderada	Si
MS20	M02 Sub OI	11 166	2 710	620	10 546	13 876	Estable	Si
MS20	M02 Sup PV	28 626	69	810	27 816	28 696	Sensible	Si
MS20	M02 Sub PV	13 001	445	25	12 976	13 446	Sensible	Si
MS30	M02 Sup OI	10 306	468	2 998	7 308	10 774	Estable	Si
MS30	M02 Sub OI	9 770	2 881	450	9 321	12 652	Estable	Si
MS30	M02 Sup PV	24 874	11	997	23 878	24 885	Sensible	Si
MS30	M02 Sub PV	11 376	449	5	11 371	11 825	Sensible	Si
MS40	M02 Sup OI	8 887	434	3 032	5 856	9 322	Estable	Si
MS40	M02 Sub OI	8 375	2 913	417	7 957	11 288	Estable	Si
MS40	M02 Sup PV	21 268	10	998	20 270	21 277	Sensible	Si

MS40	M02 Sub PV	9 751	450	4	9 746	10 200	Sensible	Si
MS50	M02 Sup OI	7 468	401	3 065	4 403	7 869	Estable	Si
MS50	M02 Sub OI	6 979	2 945	385	6 594	9 924	Estable	Si
MS50	M02 Sup PV	17 661	8	999	16 662	17 669	Moderada	Si
MS50	M02 Sub PV	8 126	450	4	8 122	8 576	Moderada	Si
Base	M05 Sup OI	24 569	204	10 407	14 162	24 773	Estable	Si
Base	M05 Sub OI	18 200	15 466	73	18 127	33 666	Estable	Si
Base	M05 Sup PV	45 628	7 081	560	45 068	52 709	Moderada	Si
Base	M05 Sub PV	33 800	12 671	1 003	32 797	46 471	Estable	Si
MS10	M05 Sup OI	18 046	801	2 604	15 443	18 847	Moderada	Si
MS10	M05 Sub OI	16 380	3 869	288	16 092	20 249	Estable	Si
MS10	M05 Sup PV	45 131	9 467	2 199	42 931	54 598	Estable	Si
MS10	M05 Sub PV	30 420	14 710	3 936	26 484	45 130	Estable	Si
MS20	M05 Sup OI	13 976	1	75	13 901	13 977	Muy sensible	Si
MS20	M05 Sub OI	14 560	34	0	14 560	14 594	Muy sensible	Si
MS20	M05 Sup PV	42 181	4 982	9 214	32 967	47 163	Estable	Si
MS20	M05 Sub PV	27 040	8 915	16 134	10 906	35 955	Estable	Si
MS30	M05 Sup OI	9 900	7	69	9 831	9 907	Muy sensible	Si
MS30	M05 Sub OI	12 740	31	3	12 737	12 771	Muy sensible	Si
MS30	M05 Sup PV	39 200	12 574	11 917	27 282	51 774	Estable	Si
MS30	M05 Sub PV	23 660	11 560	14 485	9 175	35 220	Estable	Si
MS40	M05 Sup OI	5 837	0	76	5 761	5 837	Sensible	Si
MS40	M05 Sub OI	10 920	34	0	10 920	10 954	Muy sensible	Si
MS40	M05 Sup PV	36 281	20 076	14 670	21 611	56 357	Estable	Si
MS40	M05 Sub PV	20 280	14 230	12 832	7 448	34 510	Estable	Si
MS50	M05 Sup OI	1 766	1	74	1 692	1 768	Sensible	Si
MS50	M05 Sub OI	9 100	33	1	9 099	9 133	Muy sensible	Si
MS50	M05 Sup PV	33 332	27 626	17 400	15 932	60 958	Estable	Si
MS50	M05 Sub PV	16 900	16 878	11 180	5 720	33 778	Estable	Si

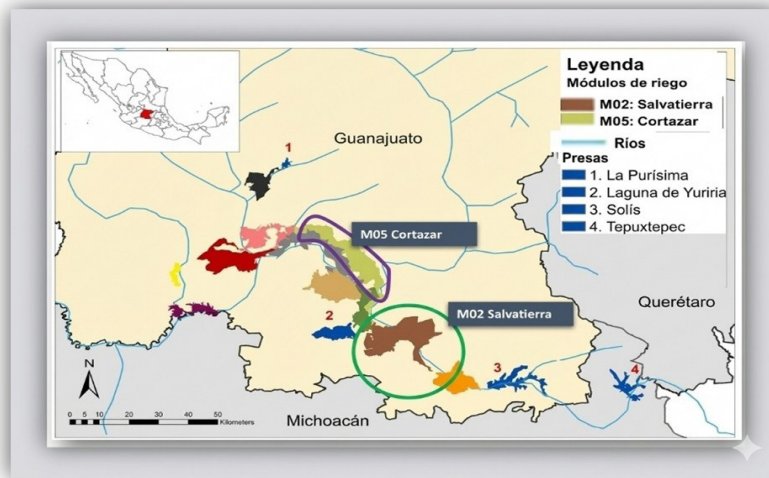
**Notas:**

1. Los valores iguales a cero en Incremento/decremento permisible, significa sin margen en esa dirección.
2. La clasificación de estabilidad se definió con base en el ancho relativo del intervalo de estabilidad respecto al RHS actual de cada restricción. Se consideró "Muy sensible" cuando el intervalo total fue <1% del RHS, "Sensible" entre 1–5%, "Moderada" entre 5–20% y "Estable" cuando fue >20%.

- Activa: restricción con *slack* = 0; su dual (precio sombra) es relevante y su validez es local, definida dentro del intervalo.

**Figura 1.**

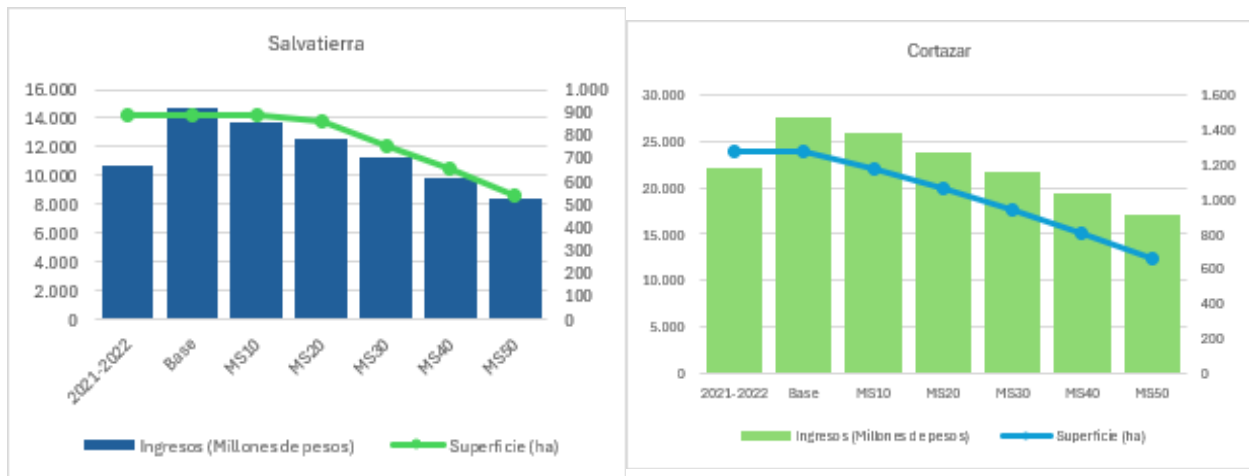
*Distrito de Riego 011, Alto Río Lerma, Guanajuato, México.*



**Fuente:** Adaptado de Rodríguez-Flores, et al. (2019)

**Figura 2.**

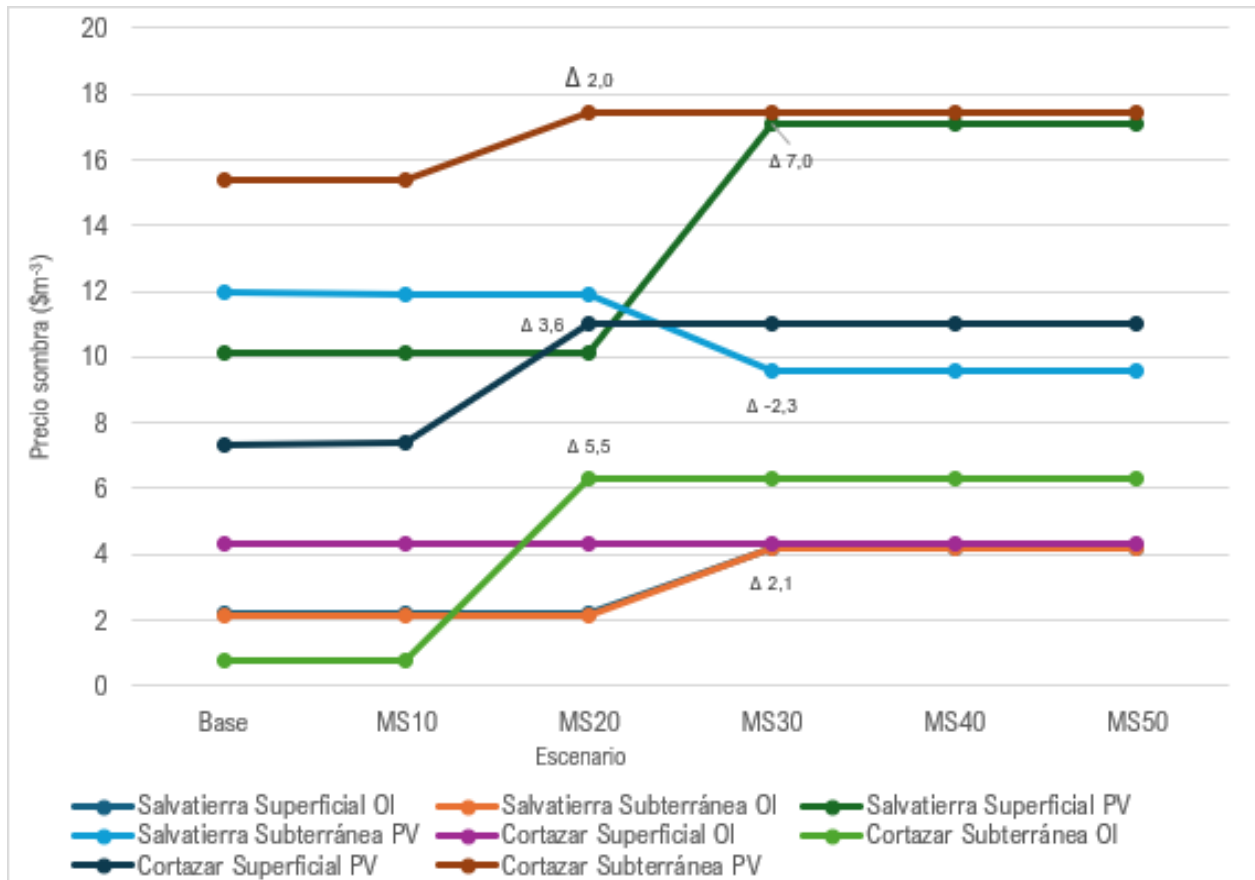
*Variación del ingreso agrícola de los módulos considerando distintos escenarios de sequía*



**Fuente.** Elaboración propia con información del DR011 y resultados de los modelos.

**Figura 3.**

Evolución de los precios sombra del agua ( $\$/m^3$ ) por escenario y combinación módulo ciclo



Fuente. Elaboración propia con resultados de las salidas de LINDO

## DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles del autor correspondiente a solicitud razonable.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

## FINANCIACIÓN

La presente investigación se realizó dentro del programa de estudios de postgrado con beca del CONAHCYT y apoyo para la recopilación de información de campo de la DICEA de la UACH.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

La contribución que los autores hicieron a la investigación consistió en la conceptualización en la región de estudio, la selección, de la metodología y el software a utilizar, así como la validación: FDFL, RVA; el análisis formal, FDFL, RVA y JHO; el trabajo de campo de la investigación FDFL y RVA; la curación de datos, FDFL, RVA y JJVC; escritura: preparación del borrador original, FDFL, RVA y JHO; escritura: revisión y edición, FDFL, RVA y JJVC; visualización, RVA y JHO; supervisión RVA y JHO; administración del proyecto FDFL y RVA.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece la atención y el otorgamiento de la información al jefe del Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, así como al personal técnico para obtener la información para realizar la investigación.

## LITERATURA CITADA

Ángeles, J. M. (2015). *Análisis de las eficiencias de riego en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, México* [Informe técnico]. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1876/OT\\_103.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1876/OT_103.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Banco de México. (2022). *Sequía en México y su potencial impacto en la actividad económica* (Recuadro 2, Informe trimestral abril-junio 2022, pp. 30-35). <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B3A0127A1-D0C9-7D61-C9AE-E57E127FB39B%7D.pdf>

Banco Mundial. (2024). *Agua: Panorama general*. Consultado el 18 de marzo de 2024 <https://www.bancomundial.org/es/topic/water/overview>;

Botello-Aguillón, C., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., Sangermán-Jarquín, D. M., & Gutiérrez-García, F. G. (2022). Reallocation of water in agriculture under drought conditions as economic efficiency maximizer. *Agro productividad*, 15(8), 187-194. <https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2191>

CEDRSSA. (2016). *Las unidades de riego para el desarrollo rural*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. <https://portales.diputados.gob.mx/CEDRSSA/publicaciones/detalles/c729c3ba-feb7-4051-b27f-bba5141b8d6e>

CEDRSSA. (2021). *Los Distritos de riego y las concesiones de agua*. Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria. <https://portales.diputados.gob.mx/CEDRSSA/publicaciones/detalles/59c08978-631a-4859-bc8d-356998026c38>

- CONAGUA. (2020). Comisión Nacional del Agua. *Programa Nacional Hídrico 2020-2024. Programa Especial derivado del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua/articulos/consulta-para-el-del-programa-nacional-hidrico-2019-2024-190499>
- CONAGUA. (2021). *Programa Hídrico Regional 2021-2024. Región Hidrológico-Administrativa VIII Lerma Santiago Pacífico*. [https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR\\_2021-2024\\_RHA\\_VIII\\_LSP.pdf](https://files.conagua.gob.mx/conagua/generico/PNH/PHR_2021-2024_RHA_VIII_LSP.pdf)
- CONAGUA (2022). *Numeragua*, edición 2022. Comisión Nacional del Agua, SEMARNAT. México. 2022. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/Numeragua%202022.pdf>
- CONAGUA. (2023). *Estadísticas del agua en México. México*, Edición 2023. SEMARNAT. [https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023\\_f.pdf](https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf)
- CONAGUA. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de Agua en el acuífero Salvatierra-Acámbaro (1118, estado de Guanajuato*. Ciudad de México. [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/guanajuato/DR\\_1118.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1118.pdf)
- CONAGUA. (2025). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Superficies regadas y volúmenes distribuidos por distrito de riego 1998 – 2023*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/936320/SUPERFICIES\\_REGADAS\\_Y\\_VOLUMENES\\_1998-2023.xlsx](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/936320/SUPERFICIES_REGADAS_Y_VOLUMENES_1998-2023.xlsx)
- DOF. (2023a). *Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2023*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5684460&fecha=31/03/2023#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5684460&fecha=31/03/2023#gsc.tab=0)
- DOF. (2023b). *Ley de Aguas Nacionales. (Última Reforma)*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/976265/162-\\_LEY\\_de\\_Aguas\\_Nacionales.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/976265/162-_LEY_de_Aguas_Nacionales.pdf).
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Informe sobre temas hídricos No. 38. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- FAO. (2020). *Versión resumida de El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Superar los desafíos relacionados con el agua en la agricultura*. Roma. <https://doi.org/10.4060/cb1441es>
- FAO. (2021). *El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Sistemas al límite. Informe de síntesis 2021*. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7654es>
- Florencio-Cruz, V., Valdivia-Alcalá, R., & Scott, C. A. (2002). Productividad del agua en el

- distrito de riego 011, Alto Río Lerma. *Agrociencia*, 36(4), 483-493. <https://agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/201/201>
- Flores-Casamayor, H., Delgado-Galván, X. y Mora Rodríguez J. 2020. Aspectos prioritarios en la gestión de los acuíferos en el Bajío de Guanajuato. Universidad de Guanajuato. En A. R. Caldera Ortega & D. Tagle Zamora (Coords.), *Agua en el bajío guanajuatense* (pp. 85–106). Universidad de Guanajuato. <https://www.ugto.mx/ugentucasa/images/pdf/libro/agua-en-el-bajio-guanajuatense.pdf>
- Godínez-Montoya, L., García-Salazar, J. A., Fortis-Hernández, M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., Valdivia-Alcalá, R., & Hernández-Martínez, J. (2007). Valor económico del agua en el sector agrícola de la Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 51-59. <https://www.redalyc.org/pdf/573/57311513007.pdf>
- HernándezPérez, J., AranaCoronado, O. A., HernándezOrtiz, J., & ValdiviaAlcalá, R. (2025). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 16(1), 138–172. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2025-01-04>
- IMCO. (2023). *Situación del agua en México: Escasez o mala gestión*. <https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2023/02/Situacion-del-agua-en-Mexico-1.pdf>
- IMTA. (2022). *Introducción seguridad hídrica*. Rojas Rueda, A. & G. Tzatchkov V. (Coords.). [https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/libros/2022/introduccion\\_seguridad\\_hidrica.pdf](https://www.imta.gob.mx/gobmx/DOI/libros/2022/introduccion_seguridad_hidrica.pdf)
- IPLANEG. (2019). *Programa Estatal de Desarrollo Urbano y Ordenamiento Ecológico y Territorial del Estado de Guanajuato* (PEDUOET 2040). Gobierno del Estado de Guanajuato. <https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/peduoet/>
- Levine, G. (2007). La cuenca del río Lerma-Chapala: Un estudio de caso de transferencia de agua en una cuenca cerrada. *Paddy and Water Environment*, 5, 247-251. <https://doi.org/10.1007/s10333-007-0088-4>
- Martínez-Luna, D., Mora-Flores, J. S., Exebio-García, A. A., Arana-Coronado, O. A., & Arjona-Suárez, E. (2021). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 100, Alfajayucan, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 39. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100110&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-57792021000100110&script=sci_arttext)
- Norton, R. D., & Hazell, P. B. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan. [https://www.researchgate.net/publication/256475967\\_Mathematical\\_Programming\\_for\\_Economic\\_Analysis\\_in\\_Agriculture](https://www.researchgate.net/publication/256475967_Mathematical_Programming_for_Economic_Analysis_in_Agriculture)
- OCDE. (2012), *Gobernabilidad del Agua en América Latina y el Caribe: Un Enfoque Multinivel*. Éditions OCDE. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264079779-es>

- OCDE. (2013), Hacer realidad la reforma del sector del agua en México, Estudios de la OCDE sobre el agua. <https://doi.org/10.1787/9789264187894-en>.
- OCDE/FAO. (2023). *Perspectivas Agrícolas 2023-2032*. <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>
- ONU. (1992). Dublin Principles. *The Dublin statement on water and sustainable development*. In International Conference on Water and the Environment, Dublin, Ireland. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0376892900030733>
- ONU. (2021). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: El valor del agua*. UNESCO. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2021/es>
- ONU. (2022a). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2022: Aguas subterráneas, Hacer visible el recurso invisible*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382894>
- ONU. (2022b). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. [https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022\\_Spanish.pdf](https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Spanish.pdf)
- ONU. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water*. UNESCO. <https://www.unesco.org/reports/wwdr/2023/en>
- Ortega-Gaucin, D., Vélez, E. P., Sáenz, E. M., & Pimentel, L. R. (2008). Una alternativa metodológica para la estimación del impacto socio-económico de la sequía en los distritos de riego. En *La Ingeniería Agrícola: Motor del Desarrollo de la Agricultura Mexicana* (pp. 134–146). Universidad Autónoma Chapingo. <https://acortar.link/9oUj80>
- Peniche-Camps, S. (2020). Castillos en la arena. Política de aguas en la cuenca de Río Lerma y los niveles del lago de Chapala. En A. R. Caldera Ortega & D. Tagle Zamora (Coords.), *Agua en el bajío guanajuatense* (pp. 107–126). Universidad de Guanajuato. <https://www.ugto.mx/ugentucasa/images/pdf/libro/agua-en-el-bajio-guanajuatense.pdf>
- Ramírez-Barraza, B. A., González Estrada, A., Valdivia Alcalá, R., Salas González, J. M., & García Salazar, J. A. (2019). Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(3), 539-550. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Rodríguez-Flores, J. M., Medellín-Azuara, J., Valdivia-Alcalá, R., Arana-Coronado, O. A., & García-Sánchez, 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(4), 858 <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/4/858>

- Rubiños-Panta, J. E. (2007). Valor económico del agua y análisis de las transmisiones de derechos de agua en distritos de riego de México. *Terra Latinoamericana*, 25(1), 043-049. <http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra/article/view/1437>
- SEMARNAT. (2018). *Informe del Medio Ambiente*. Gobierno de México. Consultado el 14 de junio de 2024 en <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367304>
- UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. UNESCO. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2020>
- Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(47), 18215-18220. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805554105>
- WEF. (2023). *The Global Risks Report 2023* 18th Edition. <https://www.weforum.org/reports/global-risks-report-2023/>
- WRI. (2023a). *UN Water Conference 2023: Not Enough Game-changing Commitments*. Consultado el 20 de septiembre de 2024 en [https://www.wri.org/insights/un-water-conference-2023-needed-outcomes?\\_gl=1\\*6or0jg\\*\\_qnLZXSLhCBN\\_2Pq4CUPjYSwNiqoy14XDKaCOyWmxRoX2XvoN9GKxBoC7rYQAvD\\_BwE](https://www.wri.org/insights/un-water-conference-2023-needed-outcomes?_gl=1*6or0jg*_qnLZXSLhCBN_2Pq4CUPjYSwNiqoy14XDKaCOyWmxRoX2XvoN9GKxBoC7rYQAvD_BwE)
- WRI. (2023b). Mexico, Aqueduct beta. Baseline water stress. Consultado el 18 de agosto de 2024 en [https://www.wri.org/applications/aqueduct/country-rankings/?\\_gl=1%2A1a73sei%2A\\_qnLZXSLhCBN\\_2Pq4CUPjYSwNiqoy14XDKaCOyWmxRoX2XvoN9GKxBoC7rYQAvD\\_BwE](https://www.wri.org/applications/aqueduct/country-rankings/?_gl=1%2A1a73sei%2A_qnLZXSLhCBN_2Pq4CUPjYSwNiqoy14XDKaCOyWmxRoX2XvoN9GKxBoC7rYQAvD_BwE)
- Young, R. A. (2005). *Determining the Economic Value of Water: Concepts and Methods. Resources for the Future*.
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: concepts and methods*. (2nd ed.). Routledge.
- Zetina-Espinosa, A. M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., Cruz-Jiménez, J., & Téllez-Delgado, R. (2013). Valor económico del agua en el distrito de riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 10(2), 139-156. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722013000200001&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-54722013000200001&script=sci_arttext)