



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

“VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN EL DISTRITO DE RIEGO 011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO.”

TESIS

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA
AGRÍCOLA**

PRESENTA:

JOSÉ GILBERTO CORTÉS RAMÍREZ

BAJO LA SUPERVISIÓN DE:

DRA. DIXIA DANIA VEGA VALDIVIA

Chapingo, México; noviembre 2024

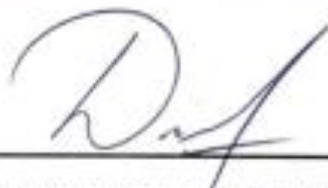


VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN EL DISTRITO DE RIEGO 011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO

Tesis realizada por José Gilberto Cortés Ramírez bajo la
dirección del Jurado indicado, aprobada por el mismo y
aceptada como requisito parcial para obtener el título de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

DIRECTOR:



DRA. DIXIA DANIA VEGA VALDIVIA

ASESOR:



DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR:



DR. CÉSAR BOTELLO AGUILLÓN

ASESOR:



DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTIZ

LECTOR EXTERNO:



DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO

Contenido

LISTA DE CUADROS	iv
LISTA DE FIGURAS	iv
ABREVIATURAS USADAS	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
DATOS BIOGRÁFICOS.....	vii
RESUMEN GENERAL	viii
GENERAL ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación.....	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1 General:	4
1.4.2 Específicos:	5
1.5 Hipótesis.....	5
1.5.1 General:	5
1.5.2 Específicas:	5
1.6 Estructura del documento.....	6
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	8
2.1 El problema del agua	8
2.2 La valoración de recursos hídricos	14
2.3 Literatura citada.....	18
III. AGUA VIRTUAL Y TARIFAS EN LOS PRINCIPALES CULTIVOS DEL DISTRITO DE RIEGO 011, GUANAJUATO, MÉXICO.	29
3.1 Resumen	29
3.2 Abstract	30
3.3 Introducción.....	30
3.4 Materiales y métodos.....	32
3.4.1 Área de estudio	32
3.5 Resultados y Discusión	35
3.6 Conclusiones.....	38
3.7 Literatura citada.....	39
IV. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE USO AGRÍCOLA BAJO ESCENARIOS DE ESCASEZ EN EL SURESTE DE GUANAJUATO	42
4.1 RESUMEN	42
4.2 ABSTRACT	43
4.3 INTRODUCCIÓN	43
4.4 MATERIALES Y MÉTODOS	46
4.4.1 Área de estudio.....	46

4.4.2 Modelo de programación lineal	47
4.5 RESULTADOS	51
4.6 DISCUSIÓN	54
4.7 CONCLUSIONES.....	55
4.8 CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES	56
4.9 AGRADECIMIENTOS	56
4.10 LITERATURA CITADA	57
V. CONCLUSIONES GENERALES	62

LISTA DE CUADROS

Tabla 1. Superficie sembrada, rendimiento y lámina de riego de los principales cultivos por módulo.....	34
Tabla 2. Superficie sembrada y volumen de agua de los cultivos seleccionados por módulo.....	48
Tabla 3. Restricciones de recursos para el modelo base.....	50
Tabla 4. Precios sombra del agua por gravedad (\$MN/dam ³) para cada módulo	51
Tabla 5. Ingresos netos por modulo en distintos escenarios de disponibilidad de agua (millones de \$MN.).....	52

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma.....	33
Figura 2. Costo del agua para producir una tonelada de cultivo.....	35
Figura 3. Cantidad de agua consumida para producir una tonelada de cultivo..	36
Figura 4. Tarifa calculada por dam ³ de agua.....	37
Figura 5. Volumen de agua superficial utilizado por escenario (dam ³).....	54

ABREVIATURAS USADAS

CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
dam ³	Decámetros cúbicos (1000 m ³)
DOF	Diario Oficial de la Federación
DR	Distrito de Riego
DR011	Distrito de Riego 011 Alto Rio Lerma
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
ha	Hectárea(s)
ICWE	Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente
m ³	Metros cúbicos
Mm ³	Millones de metros cúbicos
MXN \$	Pesos mexicanos
PM	Programación matemática
PL	Programación lineal
PMP	Programación matemática positiva
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico
ONU	Organización de las Naciones Unidas
O-I	Ciclo agrícola otoño-invierno
P-V	Ciclo agrícola primavera-verano
REPDA	Registro público de derechos de agua
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
SE	Secretaría de Economía
S. de R.L.	Sociedad de Responsabilidad Limitada
t	Tonelada(s)

AGRADECIMIENTOS

***Al Consejo Nacional de
Humanidades, Ciencias y
Tecnologías (CONAHCYT)***

*Por el apoyo económico otorgado para
la realización y culminación de mis
estudios de posgrado.*

***A la Universidad Autónoma
Chapingo y a la División de Ciencias
Económico-Administrativas (DICEA)***

*Por ser mi alma mater y permitir
desarrollarme como profesionista
dentro de sus instalaciones.*

A todos los miembros del jurado

*Por su participación y colaboración
desinteresada en la revisión del
documento final del presente trabajo de
investigación.*

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre:	José Gilberto Cortés Ramírez
Fecha de nacimiento:	02 de agosto de 1992
Lugar de nacimiento:	Monterrey, Nuevo León, México
CURP:	CORG920802HNLRL09
Profesión:	Economista

Desarrollo académico

Licenciatura:	Licenciatura en Economía
Cédula profesional:	10919138
Maestría:	Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales
Cédula profesional:	12988504

RESUMEN GENERAL

VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE USO AGRÍCOLA EN EL DISTRITO DE RIEGO 011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MÉXICO¹. La determinación de tarifas adecuadas para el agua destinada a la agricultura es esencial para fomentar su uso eficiente y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos. Investigaciones recientes han señalado que las tarifas actuales no cubren los costos de operación y mantenimiento, subrayando la necesidad de políticas que reflejen el verdadero valor económico del agua. En el Distrito de Riego 011 de Guanajuato, se realizaron dos estudios para abordar esta problemática. El primero calculó la tarifa del agua por dam³ para la producción de cebada, maíz grano y trigo grano, encontrando que estas varían entre cultivos y módulos de riego. El maíz grano presentó la tarifa más elevada (\$171.2/dam³), seguido de la cebada (\$74.1/dam³) y el trigo grano (\$66.1/dam³). Un ajuste progresivo de las tarifas en función de la demanda hídrica podría mejorar su gestión. El segundo estudio evaluó el precio sombra del agua (valor marginal) y la viabilidad de un mercado de agua para enfrentar la escasez. El precio sombra del agua superficial fue de \$2.155/m³, muy superior a la tarifa actual de \$0.235/m³. Este valor incrementó con la reducción de disponibilidad hídrica, alcanzando \$2.723/m³ y \$3.129/m³ para el 75% y 50% de disponibilidad, respectivamente. Para el agua de pozo, el precio sombra osciló entre \$6.819/m³ y \$9.89/m³, frente a una tarifa promedio de \$0.588/m³. Ambos estudios concluyen que establecer tarifas basadas en el valor marginal del agua y fomentar mercados hídricos puede optimizar su uso, incrementar los ingresos agrícolas y contribuir a la sostenibilidad en contextos de alta presión hídrica.

Palabras clave: Mercado de agua; tarifas eficientes; programación lineal; control de demanda.

¹ Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: José Gilberto Cortés Ramírez
Director de tesis: Dra. Dixia Dania Vega Valdivia

GENERAL ABSTRACT

ECONOMIC VALUATION OF WATER FOR AGRICULTURAL USE IN IRRIGATION DISTRICT 011, ALTO RÍO LERMA, GUANAJUATO, MEXICO. Determining appropriate rates for water for agriculture is essential to encourage its efficient use and ensure the sustainability of water resources. Recent research has shown that current rates do not cover operation and maintenance costs, highlighting the need for policies that reflect the true economic value of water. In Irrigation District 011 of Guanajuato, two studies were conducted to address this issue. The first calculated the water rate per dam³ for the production of barley, grain corn and grain wheat, finding that these vary between crops and irrigation modules. Grain corn had the highest rate (\$171.2/dam³), followed by barley (\$74.1/dam³) and grain wheat (\$66.1/dam³). A progressive adjustment of rates based on water demand could improve water management. The second study evaluated the shadow price of water (marginal value) and the viability of a water market to address scarcity. The shadow price of surface water was \$2.155/m³, much higher than the current rate of \$0.235/m³. This value increased with the reduction in water availability, reaching \$2.723/m³ and \$3.129/m³ for 75% and 50% availability, respectively. For well water, the shadow price ranged between \$6.819/m³ and \$9.89/m³, compared to an average rate of \$0.588/m³. Both studies conclude that establishing rates based on the marginal value of water and promoting water markets can optimize its use, increase agricultural income and contribute to sustainability in contexts of high water pressure.

Key words: Water market; efficient tariffs; linear programming; demand control.

I. INTRODUCCIÓN GENERAL

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), a nivel mundial el uso irrestricto del agua ha ido creciendo a un ritmo mayor que el doble de la tasa de crecimiento de la población durante el siglo XX. Factores como el crecimiento demográfico, la urbanización y por ende la creciente demanda de alimentos, así como un ritmo acelerado del desarrollo económico y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre el vital líquido, por lo que en todas las regiones del mundo la demanda de agua ha tenido un crecimiento cada vez mayor, sobre todo, en regiones áridas y semiáridas (FAO, 2011).

1.1 Antecedentes

El agua dulce accesible y de alta calidad es un recurso limitado y de gran variabilidad. Las proyecciones de la OCDE indican que el 40% de la población mundial vive en cuencas hidrográficas bajo estrés hídrico y que la demanda del agua se incrementará en un 55% para el año 2050. Además, la sobreexplotación y la contaminación de los acuíferos a nivel mundial plantea retos importantes a la seguridad alimentaria, a la salud de los ecosistemas y al suministro de agua potable (OECD, 2015).

La agricultura es el sector con mayor uso consuntivo en el mundo de aguas superficiales y subterráneas, en México los porcentajes de uso consuntivo del agua son los siguientes: agricultura 75.7%, abastecimiento público 14.7%, industria autoabastecida 4.9% y electricidad (excluyendo hidroelectricidad) 4.7% (CONAGUA, 2019). Por si fuera poco, el uso del agua en la agricultura enfrenta grandes retos como son el cambio climático, los desafíos políticos, tecnológicos, económicos y sociales.

A pesar de todo, existen algunas formas en las que la agricultura puede adaptarse a los retos de disponibilidad, tanto del lado de la oferta como por el lado de la demanda, algunos ejemplos son: la construcción o ampliación de represas, reparar o cambiar la infraestructura dañada, reasignar el agua, adoptar prácticas que permitan un incremento de la productividad (mejoras de valor añadido, no de producción), usar fuentes alternas de abastecimiento como aguas residuales, así como mejores políticas de precios (Griffin, 2006).

Como se mencionó anteriormente, una forma en que las políticas pueden influir en una asignación eficiente del agua es gestionando su demanda, al respecto, la FAO define gestión de la demanda como *“las acciones que controlan la demanda, aumentando la eficiencia económica del uso del agua o reasignando el recurso hídrico dentro de cada sector y entre los distintos sectores”* (FAO, 2013).

Una manera de gestionar la demanda de agua es a través de los precios, para ello existen diferentes herramientas que permiten hacer un análisis sobre precios óptimos. De modo que, al conocer el valor del agua en la agricultura, los formuladores de políticas, administradores del agua y todos aquellos individuos involucrados en la gestión del agua, puedan seleccionar la mejor decisión de financiamiento y distribución del recurso, asignándolo a donde se obtenga un mayor beneficio económico, social y ambiental, previniendo la sobreexplotación.

Por ello esta investigación contribuye a la literatura existente de valoración económica de recursos naturales (en este caso el agua de uso agrícola) y que tienen en común la ausencia de mercados. Se emplea la metodología de programación matemática, aplicada a los módulos del distrito de riego 011 Alto Río Lerma, en el Estado de Guanajuato.

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad, el mundo está viviendo una serie de desafíos que van desde el incremento de la temperatura, el desperdicio o uso ineficiente del agua, así como el incremento en los niveles de la población, los cuales están provocando una mayor demanda de agua; aunado a esto, la contaminación y el deterioro medioambiental han provocado la disminución de los mantos acuíferos, por lo que las diferentes cuencas presentan problema de desecación y el nivel del agua en los lagos se ha ido reduciendo, como consecuencia se va limitando la disponibilidad de este recurso para la agricultura, poniendo en riesgo la producción del sector agrícola en algunas regiones.

El porcentaje que representa el agua empleada en usos consuntivos respecto al agua renovable es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. si el porcentaje es mayor al 40%, se considera que se ejerce una fuerte presión sobre el recurso. A nivel nacional, México experimenta un grado de presión del 19.5%, lo cual se considera bajo; ahora bien, existe una gran diversidad regional. el menor valor es el de la región hidrológica-administrativa XI Frontera sur, con 1.7%, mientras que la región con más alto grado de presión es la XIII aguas del Valle de México con 141.4% (CONAGUA, 2018).

La cuenca Lerma-Chapala (que es en donde se ubica el DR 011) se encuentra en el límite de aprovechamiento hídrico, por lo que concesionar mayor cantidad de agua superficial o subterránea implicaría afectar el aprovechamiento de usuarios aguas abajo, además de poner en riesgo el desarrollo económico de la región (Bravo Pérez et al., 2005).

El Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE) advirtió que el aumento de hasta 3 grados centígrados en la temperatura incrementará la evaporación, afectará el ciclo lluvia-escurrimiento, reducirá los recursos hídricos y agravará la brecha entre oferta y demanda de agua, especialmente en el sector agrícola,

donde se prevé que la extracción de pozos y fuentes superficiales crecerá significativamente entre 30 y 80% hacia 2030 (IEE, 2011).

Por lo anterior, resulta evidente la necesidad de implementar una serie de políticas que contribuyan a la gestión eficiente del agua (en este caso para uso agrícola). Dichas políticas deben permitir la coordinación entre los diferentes niveles de gestión, promoviendo una asignación del recurso que sea flexible ante las condiciones climáticas futuras. Pero todo ello será muy difícil de llevar a cabo si se desconoce el valor económico del agua y de la demanda de uso agrícola en el área de estudio, ya que dicho desconocimiento puede provocar que se tomen decisiones con un efecto contrario al esperado.

1.3 Justificación

Dado que el agua está estrechamente vinculada con la producción de alimentos, actualmente el 70% del uso del agua en el mundo (y el 75.7% en México) se destina a la agricultura, por lo que una política del agua exitosa es decisiva para alcanzar la seguridad alimentaria global y la mitigación de la pobreza (CONAGUA, 2019). Por ello, conocer el valor del agua es de gran importancia porque puede proveer una señal sobre la escasez que de otra forma no se conocería en ausencia de mercados, además que permitiría conocer los impactos en los beneficios económicos provocados por cambios en la disponibilidad del agua.

1.4 Objetivos

1.4.1 General:

- ❖ Estimar el valor económico del agua de uso agrícola en los módulos del Distrito de Riego 011, para mejorar la gestión de la demanda y su distribución entre sus usos alternativos.

1.4.2 Específicos:

- ❖ Determinar el valor económico del agua por decámetros cúbicos (dam³) para la producción de cebada, maíz grano y trigo grano en el Distrito de Riego 011.
- ❖ Calcular el precio sombra (productividad marginal) del agua para los módulos 06, 07 y 08 del Distrito de Riego 011 ante diferentes escenarios de escasez.
- ❖ Evaluar la posibilidad de un mercado de agua entre los módulos 06, 07 y 08 del distrito como mecanismo para enfrentar la escasez de agua en el distrito de riego.

1.5 Hipótesis

1.5.1 General:

- ❖ La valoración económica del agua en el Distrito de Riego 011 juega un rol importante en la gestión de la demanda y en una mejor distribución del líquido entre sus diferentes usos alternativos.

1.5.2 Específicas:

- ❖ Establecer una tarifa de agua adecuada podría fomentar el uso eficiente del recurso, la tecnificación del riego y la adopción de cultivos de mayor valor o menor consumo hídrico.
- ❖ La productividad del agua es indispensable para una adecuada fijación de precios y tarifas de agua que reflejen su verdadero valor económico.

- ❖ Los mercados de agua son un mecanismo que permite la distribución del agua de forma eficiente entre usuarios, así como de cultivos de menor valor a los de mayor valor, o de cultivos con menor uso de agua a los de mayor uso de agua y de ese modo ser económicamente resiliente ante panoramas de escasez.

1.6 Estructura del documento

En esta última parte correspondiente al capítulo 1 del presente documento, se describe brevemente cada uno de los siguientes capítulos de la tesis. El capítulo 2 contiene la revisión de literatura sobre el estado del arte de los temas principales que se abordan en el documento, como son la discusión sobre la crisis del agua, algunos métodos sobre la valoración de recursos naturales y por supuesto, la revisión de trabajos relacionados con los capítulos 3 y 4.

El capítulo 3 corresponde al primer manuscrito y cuyo objetivo fue determinar la tarifa del agua por dam^3 para producir una tonelada de cebada, maíz grano y trigo grano, en los diferentes módulos del distrito de riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato. El enfoque de la metodología fue cuantitativo a partir de datos de la cuota vigente de riego, la superficie sembrada, el rendimiento del cultivo y la lámina de riego.

El capítulo 4 corresponde a un segundo manuscrito, donde a través de un modelo de programación lineal se construye la simulación de un mercado de agua entre tres de los once módulos de riego del DR 011, y cuyo objetivo fue determinar el valor económico del agua de uso agrícola ante distintos escenarios de escasez, además de comparar los ingresos generados y la eficiencia en la asignación del agua cuando existe un mercado de agua y cuando no lo hay.

Por último, en el capítulo 5 se abordan las conclusiones generales a las que se llegó con la elaboración de los dos manuscritos correspondientes a los capítulos previos del presente documento.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

En el presente capítulo se aborda la discusión en torno a la problemática de los recursos hídricos, la gobernanza del agua, la concepción del valor del agua, etc. Así como los diferentes tipos de metodologías que existen para la valoración económica de los recursos naturales y cuya característica común es la ausencia de mercados para dichos recursos. En general, se analiza la literatura relacionada con los temas de los próximos dos capítulos.

2.1 El problema del agua

La escasez de agua se define como la situación en la que la demanda de agua dulce excede la disponibilidad en un área determinada, teniendo en cuenta las condiciones existentes de infraestructura y gobernanza. Este concepto no solo refleja la insuficiencia física del recurso, sino también la incapacidad de las instituciones y políticas para garantizar su acceso equitativo y sostenible. Se distingue entre la escasez física, causada por la insuficiencia de agua para satisfacer la demanda total, y la escasez económica, derivada de la falta de inversiones o capacidades para aprovechar los recursos disponibles. En muchos casos, esta problemática también está vinculada a decisiones políticas deficientes y a una distribución desigual (FAO, 2013).

Desde hace algunas décadas existe la creencia bastante extendida de que el agua está empezando a ser un bien escaso como resultado de ciertas tendencias que son hasta cierto punto inevitables, como lo es el crecimiento de la población y, en consecuencia, el incremento de la demanda de agua para la producción de alimentos y para usos domésticos, industriales y municipales. Esto hace que muchas personas lleguen a la conclusión de que una “crisis del agua” es inevitable (Brown et al., 1999).

Es importante mencionar que de acuerdo con el Consejo Mundial del Agua (WWC), el 70% de la superficie de la Tierra es agua y tan sólo 30% es tierra firme. Del total del agua 97.5% es salada (agua de mares y océanos), el 2.5% restante es agua dulce, de la cual 69.7% es agua congelada en los polos y glaciares, 30% es subterránea y respecto a agua superficial hay sólo 0.3% (2% en los ríos, 11% pantanos y 87% lagos). El agua restante se ubica en la humedad del suelo, vapor atmosférico, seres vivos y la corteza terrestre (WWC, 2018).

En el año de 1992, los participantes de la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (ICWE por sus siglas en inglés) publicaron lo que se más tarde se conocería como la Declaración de Dublín. Esta declaración define el agua dulce como *“un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el medio ambiente que debe ser manejada y administrada con amplios enfoques participativos”*. Esta declaración también hace un reconocimiento al valor económico del agua (ICWE, 1992).

Aunque en dichos principios se menciona el hecho de que el no reconocer el valor económico del agua ha provocado un uso excesivo de este recurso, así como un impacto negativo en el medio ambiente, todavía no se tiene un precio que refleje el valor del agua, únicamente se paga una pequeña fracción por concepto de electricidad y traslado del agua, por lo tanto, valorar el agua como un bien económico es una forma de lograr un uso eficiente y equitativo, más aún en los lugares donde es escasa (Speed et al., 2013).

En la agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se menciona que la escasez hídrica afecta a los países menos desarrollados en el mundo, pero también influye en la hambruna y en una mala alimentación, además se estima que para el año 2050, es probable que al menos la cuarta parte de la población mundial radique en países con problemas severos de escasez de agua dulce (CEPAL, 2018). De acuerdo con Griffin (2006), para hacer frente al problema de escasez hídrica, existen dos vías; la primera es fortaleciendo las estrategias de

suministro y la segunda es mejorando la gestión de la demanda, de hecho lo ideal sería la combinación de ambas estrategias.

La gestión eficiente del agua puede abordarse en tres niveles. En el nivel del usuario, es clave mejorar la eficiencia local mediante precios basados en costos marginales, tecnologías de ahorro y concienciación. A nivel sectorial, la asignación de recursos hídricos entre actividades económicas, como salud pública y medio ambiente, debe maximizar el valor del agua en distintos usos, equilibrando demandas y limitando el suministro en situaciones de escasez, lo que recae en decisiones gubernamentales. Finalmente, a nivel global, el comercio de agua virtual permite a países con escasez hídrica importar productos intensivos en agua y exportar aquellos que demandan menos, mientras las naciones con abundancia de agua producen y exportan bienes intensivos en agua, reduciendo así la presión sobre los recursos hídricos locales (Hoekstra & Hung, 2002).

La ausencia de políticas públicas efectivas en materia de agua tiene un impacto significativo en la salud pública, particularmente en lo referente a la calidad y seguridad del agua para consumo humano (Cáñez-Cota, 2022). Asimismo, es fundamental a nivel nacional asegurar que las aguas residuales provenientes de diversas actividades económicas reciban un tratamiento adecuado, lo que permitiría garantizar el acceso seguro al agua potable y promover una gestión integral de los recursos hídricos (Vidal & Asuaga, 2021).

Ignorar los desafíos que complican la gestión del agua podría intensificar, con el tiempo, los problemas sociales relacionados con este recurso, elevándolos en importancia para los responsables de formular políticas. Dado que las variables del ciclo hidrológico cambian constantemente en el tiempo y el espacio, resulta complejo prever cuándo o dónde se manifestará la escasez de agua; no obstante, se anticipa que estos eventos serán cada vez más frecuentes y severos (Sheffield et al., 2018).

Si no se hace nada por mitigar los problemas referentes a la escasez de agua, la creciente variedad de demandas del agua por el ser humano se convertirá en un problema de orden de importancia de los usos del agua por la falta de mecanismos de toma de decisiones, principalmente porque aún persiste el debate de posturas sobre si, el agua, debe ser tomada como un bien económico o como un derecho humano, ello a pesar que desde la declaración de Dublín, se reconoció su valor económico (Tagle-Zamora et al., 2019).

Paradójicamente, la creciente escasez de agua puede llevar al desarrollo de instituciones más sólidas, ya que, como señala Gleick (2003), el agua tiene múltiples aplicaciones esenciales. Estas incluyen necesidades básicas como beber, cocinar y limpiar para el bienestar humano, así como su uso en la producción de alimentos, bienes industriales, transporte, comunicaciones, eliminación de residuos, y actividades recreativas o de lujo. Además, el agua es crucial para el equilibrio ambiental, el cual sustenta una gran diversidad de vida en el planeta, lo que hace imprescindible asignar una parte del recurso para preservar los ecosistemas (Panceri, 2019).

Abordar la escasez requiere estrategias integrales que incluyan mejoras en la eficiencia del uso del agua, inversiones en infraestructura, implementación de políticas de gestión de la demanda y adopción de tecnologías innovadoras. Estas acciones pueden prevenir conflictos entre usuarios, reducir impactos ambientales y garantizar la seguridad hídrica (FAO, 2013).

El artículo cuarto de nuestra constitución política habla sobre la importancia que tiene el agua para la vida y la sociedad en general: *“toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación*

de la ciudadanía para la consecución de dichos fines” (Constitución Política de Los Estados Unidos Mexicanos, 2022).

Anualmente, México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De esta agua, se estima que el 72.1% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta los flujos de salida (exportaciones) y de entrada (importaciones) de agua con los países vecinos, el país anualmente cuenta con 451,584.7 millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. El agua renovable por habitante en México era de 11,500 metros cúbicos en 1955, y por efecto del crecimiento demográfico disminuyó a 3,620 metros cúbicos en 2018 (CONAGUA, 2019).

En México, la infraestructura de presas enfrenta un grave problema, ya que muchas fueron construidas a partir de la década de 1950, especialmente durante los años 50 y 60. Estas estructuras no fueron diseñadas para funcionar durante periodos tan extensos, lo que ha provocado un notable deterioro y altos niveles de sedimentación. Como resultado, gran parte de estas presas ha visto reducida significativamente su capacidad de almacenamiento (Domínguez, 2019).

Uno de los principales obstáculos para mejorar la infraestructura hídrica en México radica en la deficiencia de las políticas públicas en este ámbito. Estas limitan el progreso debido a las tensiones que surgen con la población, especialmente en torno a los posibles aumentos en las tarifas del servicio (Martínez-Mendoza et al., 2021).

En este contexto, Arreguín-Cortés et al. (2020) destacan que México debe destinar los recursos necesarios para fomentar la investigación y el desarrollo tecnológico, a fin de mejorar la gestión integral del agua en el marco de la cuarta Revolución Industrial. Esto implica priorizar la innovación tecnológica para el diseño y

construcción de presas más eficientes, aprovechando las herramientas y avances tecnológicos actuales para superar las limitaciones de las infraestructuras más antiguas.

Según la ONU (2019), el suministro de agua enfrenta una reducción progresiva, especialmente en regiones semiáridas y vulnerables. Este fenómeno, agravado por la contaminación y el calentamiento global (Wada et al., 2016), resulta en una disminución de precipitaciones y un aumento de la evapotranspiración, con impactos negativos en las ciudades, la agricultura y la generación de energía hidroeléctrica.

De acuerdo con Strange & Bayley (2012), el manejo del recurso hídrico se debe hacer tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos, culturales y ambientales que suponen un desarrollo sostenible. Para Shiva (2003), *“en el paradigma del mercado se considera la escasez del agua como una crisis derivada de que no se comercia el agua. Si esta pudiera trasladarse y distribuirse libremente en mercados libres, se transferiría a las regiones de escasez y el alza de los precios conduciría a la conservación”*.

Es fundamental asignar un valor al agua y garantizar que los usuarios, particularmente en el sector agrícola, estén dispuestos a pagar por su uso. Esto proporciona un fundamento para implementar políticas e instrumentos económicos, como mecanismos de precios y mercados de agua, que faciliten la redistribución del recurso entre diferentes usuarios. Tal redistribución podría consistir en transferir agua de actividades agrícolas con menor valor económico a aquellas con mayor valor, o de cultivos con menor uso consuntivo a cultivos con mayores requerimientos hídricos (Griffin, 2006).

La agricultura es el sector económico más vulnerable frente a la escasez de agua, ya que, aunque a menudo se le considera un usuario "residual" frente a los sectores doméstico e industrial, representa el 70% de las extracciones de agua

dulce a nivel mundial y más del 90% del uso consuntivo. Además, es el sector con mayor capacidad de adaptación y ajuste frente a esta (FAO, 2021).

“Sólo si trabajamos para mejorar el uso del agua en la agricultura, seremos capaces de superar los grandes desafíos a los que se enfrentará la humanidad en los próximos 50 años por causa de la escasez de agua dulce”. En otras palabras, seguir haciendo lo de siempre no es una opción viable. Para poder evitar crisis tanto transitorias como a largo plazo, es necesario hacer cambios reales en la forma en la que se regula y usa el agua (FAO, 2013).

2.2 La valoración de recursos hídricos

Los métodos de valoración más simples se basan en los precios de mercado, ya que muchos bienes y servicios del sector primario, como productos agrícolas, madera, carne, pescado y minerales, se comercializan en mercados locales o internacionales. Estos precios permiten elaborar cuentas financieras que evalúan costos y beneficios entre distintas opciones de uso de la tierra. Es importante destacar que los precios en el mercado surgen de la interacción entre productores y consumidores, determinada por la oferta y la demanda de estos bienes y servicios (León, 2010).

En algunos casos, los bienes y servicios carecen de un mercado propio, pero su valor puede estimarse utilizando los precios de mercado de bienes similares, como la leña comercializada en diferentes regiones, o mediante el valor de su mejor alternativa o sustituto, como el carbón vegetal. En este sentido, la precisión con la que el mercado alternativo refleja el valor del bien depende del nivel de similitud o capacidad de sustitución entre ambos (León, 2010).

Cuando se trata de bienes y servicios sin mercado ni sustitutos directos, como el agua, se han desarrollado dos enfoques metodológicos para su valoración

económica, basados en las técnicas cuantitativas utilizadas: el enfoque inductivo y el enfoque deductivo.

El enfoque inductivo, ampliamente aplicado para valorar servicios ambientales de ecosistemas, áreas naturales y parques recreativos, incluye métodos como el costo de viaje. Este método, basado en encuestas, asume que los consumidores valoran un servicio ambiental al menos en la medida del costo total de acceder al recurso, considerando tanto los gastos directos de transporte como el costo de oportunidad del tiempo empleado en desplazarse al sitio (Caballer & Guadalajara, 1998).

El método de valoración contingente, también basado en entrevistas, recopila estimaciones de valor expresadas por las personas en relación con cambios específicos en la cantidad o calidad de un servicio ambiental. Estas estimaciones son consideradas "contingentes" porque se derivan de escenarios hipotéticos planteados por los investigadores durante las entrevistas (Mitchell & Carson, 1993). Cabe destacar que los enfoques basados en precios de mercado, mercados sustitutos y funciones de producción se fundamentan en la utilización de precios de mercado, reflejando así las preferencias reveladas para estimar el valor económico de los servicios ambientales.

El enfoque deductivo, ampliamente utilizado para la valoración económica del agua en el sector agrícola y aplicado en esta investigación, incluye modelos de programación matemática (PM). Estos modelos permiten determinar la asignación óptima de agua, ya sea a nivel de finca o distrito de riego, junto con otros recursos como tierra, capital, mano de obra y tecnología, entre diversos cultivos potenciales. A través de estas herramientas, se calcula el aporte hídrico, el rendimiento de los cultivos y el retorno neto del agua como parte de la solución óptima (Young & Loomis, 2014).

La programación matemática, con orígenes que se remontan a los siglos XVII, XVIII y XIX, ha evolucionado junto con la investigación de operaciones, una disciplina enfocada en optimizar la asignación de recursos limitados frente a múltiples demandas (Camero et al., 2016). En términos generales, esta herramienta facilita la distribución eficiente de recursos escasos entre demandas competitivas y abarca diversas ramas, como la programación lineal, no lineal, dinámica e integral, entre otras (Chakraborty et al., 2020).

En el sector agrícola, la programación matemática se desarrolló como una herramienta para modelar la economía de la producción en su dimensión espacial, proporcionando a agricultores, agrónomos y otros especialistas un medio eficaz para optimizar el uso de insumos y productos. Esto se logra considerando el ciclo de los cultivos y los coeficientes de insumo-producto por unidad de tierra (Hazell & Norton, 1986).

La programación matemática presenta diversas variantes, entre ellas la programación lineal, cuadrática y no lineal, cada una con características que dependen de las funciones (lineales o no lineales) y variables involucradas (continuas o discretas) (Minjares-lugo et al., 2010). Entre los modelos más empleados destacan la programación lineal y cuadrática, aplicados en áreas como finanzas (Mussafi & Ismail, 2021), economía ambiental (Sheffield et al., 2018), economía energética (McLarty et al., 2019), química (Okoro et al., 2020) y, por supuesto, la agronomía (Mejía Reyes et al., 2017; Quintana-Ashwell et al., 2021).

En la economía del agua, los modelos de programación matemática se emplean con frecuencia para analizar los beneficios de ajustar la asignación o calidad del agua en sectores como el agrícola (Archibald & Marshall, 2018; Rubiños-Panta et al., 2004) e industrial (Kung & Wu, 2021; Wong et al., 2020). Estos modelos integran factores administrativos, económicos y ambientales, con el objetivo de maximizar los ingresos netos dentro de las limitaciones de recursos disponibles y los acuerdos institucionales establecidos.

En años recientes, la programación matemática ha probado ser una herramienta eficaz para valorar el uso del agua en la agricultura, abordando temas como la gobernanza hídrica, el cambio climático, la calidad del agua y los sistemas de riego (Young & Loomis, 2014). Según Chase et al. (2009), la programación lineal (PL) se centra en optimizar la asignación de recursos limitados frente a demandas en competencia. Este método busca calcular el valor óptimo de una función lineal, respetando un conjunto de restricciones y bajo supuestos de proporcionalidad, aditividad, divisibilidad y certeza en los parámetros (Kaiser & Messer, 2011).

En situaciones donde no se cumplen los supuestos de rendimientos constantes a escala o las actividades están interrelacionadas, la programación no lineal (PNL) ofrece una mayor flexibilidad. Esto resulta especialmente útil en casos como la asignación eficiente de agua de riego entre cultivos o el diseño de redes óptimas para la distribución de agua en el ámbito agrícola (Núñez-López et al., 2018; Tang et al., 2019).

Zhang & Guo (2018) diseñaron un modelo de programación lineal de enteros mixtos para la gestión agrícola del agua, incorporando necesidades ecológicas y proporcionando soluciones óptimas alineadas con las preferencias de los tomadores de decisiones. Por su parte, Li et al. (2018) utilizaron modelos de programación lineal multiobjetivo en un distrito de riego, integrando la promoción de ingresos, la producción y el ahorro de agua, además de evaluar las compensaciones en la gestión hídrica bajo condiciones de incertidumbre.

En un modelo robusto de PL, Zhou et al. (2019) demostraron que es posible generar decisiones de gestión resilientes frente a perturbaciones en los datos, garantizando el cumplimiento de restricciones clave como la disponibilidad de recursos naturales y los límites de capacidad ambiental.

En contextos de escasez de agua, los agricultores deben ajustar sus patrones de cultivo, y la programación lineal (PL) se presenta como una herramienta eficaz para calcular el precio sombra del agua de riego y diseñar tarifas que optimicen las ganancias de los productores, además de analizar la equidad en la transferencia del recurso (Reyes Martínez et al., 2019), así como evaluar la factibilidad de mercados de agua para hacer frente a condiciones de escasez de agua o de sequía (Botello Aguillón et al., 2022; Rodríguez-Flores et al., 2019). En distritos de riego que no funcionan bajo condiciones de óptimo económico, la PL permite maximizar los recursos disponibles, aumentando la superficie cultivada y mejorando la eficiencia económica mediante la reasignación del agua hacia cultivos de mayor valor económico (Martínez-luna et al., 2021; Torres et al., 2020).

Colby & Isaaks (2018) subrayaron la importancia del análisis de precios en transacciones de agua como herramienta para comprender las políticas hídricas y desarrollar soluciones adaptadas a regiones con crecientes demandas agrícolas, urbanas y ambientales, especialmente ante la variabilidad en el suministro del recurso.

Como se observa en la literatura, el uso de la programación matemática en la gestión hídrica es un campo crucial. La calidad de los resultados depende de la precisión de los datos, y su aplicación práctica puede ofrecer recomendaciones valiosas para abordar los retos presentes y futuros de la escasez de agua, incentivando políticas públicas que reduzcan los impactos negativos de este problema.

2.3 Literatura citada

Archibald, T. W., & Marshall, S. E. (2018). Review of Mathematical Programming Applications in Water Resource Management Under Uncertainty.

Environmental Modeling and Assessment, 23(6), 753–777.

<https://doi.org/10.1007/s10666-018-9628-0>

Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los

- retos del agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 341–371.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Bosworth, B., Cornish, G., Perry, C., & Steenbergen, F. van. (2002). Water Charging in Irrigated Agriculture; Lessons from the literature. In *HR Wallingford* (Issue Report OD 145).
- 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>
- Bravo Pérez, H. M., Castro Ramírez, J. C., & Gutiérrez Andrade, M. Á. (2005). El banco de agua: una propuesta para salvar el lago de Chapala. *Gestión y Política Pública*, XIV(2), 289–309.
- Brown, L. R., Gardner, G., & Halweil, B. (1999). BEYOND MALTHUS Nineteen Dimensions of the Population Challenge. In *Worldwatch Institute* (First). www.worldwatch.org
- Caballer, V., & Guadalajara, N. (1998). Valoracion Economica Del Agua De Riego. In *Mundi Prensa*.
- Camero, Y., Martínez, L., & Pérez, V. (2016). El Desarrollo De La Matemática Y Su Relación Con La Tecnología Y La Sociedad. Caso Típico Development of Mathematics and Its Relationship With Technology and Society. Typical Case. *Revista Universidad y Sociedad*, 8(1), 97–105. <http://rus.ucf.edu.cu/>
- Cáñez-Cota, A. (2022). Municipal wastewater treatment plants in Mexico: Diagnosis and public policy challenges. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 13(1), 184–245. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2022-01-05>
- Castro, J., Cruz, F., Magaña, J., Martínez, G., Reyes, A., & Sainz, R. (2017). La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural*, 2(2), 145–180.
- CEAG. (2021). Mejores comités, mejores comunidades. Manual básico. In *Comisión Estatal del Agua de Guanajuato* (6th ed.). https://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/manuales/Manual_Basico.pdf
- CEPAL. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una

- oportunidad para América Latina y el Caribe Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL. In *Publicación de las Naciones Unidas*.
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Chakraborty, A., Chandru, V., & Rao, M. R. (2020). A linear programming primer: from Fourier to Karmarkar. *Annals of Operations Research*, 287(2), 593–616.
<https://doi.org/10.1007/s10479-019-03186-2>
- Chambers, R. G. (1988). Applied production analysis : a dual approach. In *Cambridge University Press*.
- Chase, R. B., Jacobs, F. R., & Aquilano, N. J. (2009). Administración de operaciones. Producción y cadena de suministros. In *McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. de C.V.* (12th ed.).
- Chong, H., & Sunding, D. (2006). Water markets and trading. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 239–264.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.020105.100323>
- Colby, B., & Isaaks, R. (2018). Water Trading: Innovations, Modeling Prices, Data Concerns. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 165(1), 76–88. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2018.03295.x>
- CONAGUA. (2018). Atlas del Agua en México 2018. In *Comisión Nacional del Agua*.
- CONAGUA. (2019). Estadísticas del Agua en México 2019. In *Comisión Nacional del Agua*. <https://www.gob.mx/conagua>
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021. In *Comisión Nacional del Agua*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2021.pdf
- CONAGUA, Gobierno del Estado de Guanajuato, & COLMERN, A. C. (2015). Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato. Resumen ejecutivo. In *CONAGUA*. <https://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/resumenejecutivo.pdf>
- 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 (Switzerland)*, 7(9), 11.
<https://doi.org/10.3390/agriculture7090073>

- Dai, Z. Y., & Li, Y. P. (2013). A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 129, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.013>
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, Diario Oficial de la federación 1 (2022).
- Domínguez, J. (2019). La construcción de presas en México. *Gestión y Política Pública*, XXVIII(1), 3–37. <http://orcid>.
- Exebio-García, A., Palacios-Vélez, E., Mejía-Saen, E., & Ruiz-Carmona, V. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 213–223.
- FAO. (2011). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Managing Systems at Risk. In *FAO and Earthscan* (First). <http://www.fao.org/3/i1688e/i1688e.pdf>
- FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. In *Informe Sobre Temas Hídricos no. 38*. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- FAO. (2021). The State of Food and Agriculture 2021. Making agrifood systems more resilient to shocks and stresses. In *Food and Agriculture Organization*.
- Fernández-Durán, J. J., & Lloret, A. (2016). Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma-Chapala. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 129–138.
- Food Ang agriculture organization Of The United Nation. (2021). THE STATE OF THE WORLD´S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE. In *FAO*. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2005). México – Los ‘ Cotas ’: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato. In *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. GWMate. Banco Mundial*. (Issue Caso 10). <https://documents1.worldbank.org/curated/en/784481468278736418/pdf/388100SPANISH01WMATE1CP11001PUBLIC1.pdf>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*

(Núm. 5).

<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>

Gleick, P. H. (2003). Water use. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 275–314. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.28.040202.122849>

Griffin, R. C. (2006). Water Resource Economics. The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects. In *The MIT Press*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2479-2>

Guzmán-Soria, E., Hernández-Martínez, J., García-Salazar, J. A., Rebollar-Rebollar, S., de la Garza-Carranza, M. T., & Hernández-Soto, D. (2009). Consumo de agua subterránea en guanajuato, México. *Agrociencia*, 43(7), 749–761.

Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>

Hazell, P. B. R., & Norton, R. D. (1986). Mathematical Programming for Economic Analysis in Agriculture. In *Macmillan Publishing Company*.

Hernández Pérez, J., Hernández Ortiz, J., Valdivia Alcalá, R., & Arana Coronado, O. A. (2024). Tarifas y Agua Virtual en Tres Cultivos del Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 7507–7519. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9291

Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>

Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In *IHE DELFT* (Issue 11). <https://doi.org/10.4324/9780203867785-15>

ICWE. (1992). *Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente: Declaración de Dublín*. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/30961>

IEE. (2011). Diagnóstico Climatológico y prospectiva sobre Vulnerabilidad al Cambio Climático en el Estado de Guanajuato. In *SEMARNAT, INE, CCAUG*,

& IEE, Eds.

- Kaiser, H. M., & Messer, K. D. (2011). Mathematical Programming for Agricultural, Environmental, and Resource Economics. In *John Wiley & Sons, Inc.* (Vol. 4).
- Kung, C. C., & Wu, T. (2021). Influence of water allocation on bioenergy production under climate change: A stochastic mathematical programming approach. *Energy*, 231, 120955. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120955>
- León, J. (2010). ECONOMÍA APLICADA. In *Universidad Nacional del Callao/ Editorial Universitaria*.
https://economia.unmsm.edu.pe/org/arch_doc/JLeonM/publ/Interiores_Economia_Aplicada.pdf
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., & Liu, D. (2018). An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 196, 24–36.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.016>
- Marston, L., & Konar, M. (2017). Drought impacts to water footprints and virtual water transfers of the Central Valley of California. *AGU Water Resources Research*, 5(55), 5756–5773. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- 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, 1–12.
<https://doi.org/10.28940/terra.v39i=.544>
- Martínez-Mendoza, A., Domínguez-Mariani, E., & Altamirano-Santiago, M. (2021). LA GOBERNANZA HÍDRICA COMO UN DESAFÍO NACIONAL. EL AGUA EN EL CONTEXTO POST-PANDEMIA. EL CASO DE LERMA, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO. *Revista de Investigaciones Universidad Del Quindío*, 33(2), 174–186. <https://doi.org/10.33975>
- McLarty, D., Panossian, N., Jabbari, F., & Traverso, A. (2019). Dynamic economic dispatch using complementary quadratic programming. *Energy*, 166, 755–764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.087>
- Mejía-Saenz, E., Palacios-Vélez, E., Chávez-Morales, J., Zazueta-Ranahan, F.,

- Tijerina-Chávez, L., & Casas-Díaz, E. (2003). EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO DE RIEGO 011 ALTO RÍO LERMA , GUANAJUATO , MÉXICO. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 523–531. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321408>
- Mejía Reyes, P., Reyes Hernández, M. R., & Sánchez Castañeda, K. T. (2017). Gasto público y crecimiento económico de los estados del centro de México : un análisis de cambio estructural para el periodo 1980-2012. *Paradigma Económico*, 9(2), 33–64.
- Minjares-lugo, J. L., Valdés, J. B., Salmón-Castelo, R. F., Oroz-Ramos, L. A., & López-Zavala, R. (2010). Planeación , manejo y evaluación sustentable de los recursos hidráulicos en el Distrito de. *Tecnología y Ciencias Del Agua, Antes Ingeniería Hidráulica En México*, 1(1), 137–151.
- Mitchell, R. C., & Carson, R. T. (1993). Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method. In *Resources for the Future* (Third). <https://doi.org/10.4324/9781315060569>
- Mussafi, N. S. M., & Ismail, Z. (2021). Optimum risk-adjusted islamic stock portfolio using the quadratic programming model: an empirical study in Indonesia. *The Journal of Asian Finance, Economics ...*, 8(5), 839–850. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0839>
- Núñez-López, J. M., Hernández-Calderón, O. M., Ponce-Ortega, J. M., Cervantes-Gaxiola, M. E., & Rubio-Castro, E. (2018). Optimal Design of Sustainable Agricultural Water Networks. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(1), 1–53. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03901>
- OECD. (2015). OCDE Principles on Water Governance. In *OECD*.
- Okoro, E. E., Otuekpo, J. E., Ekeinde, E. B., & Dosunmu, A. (2020). Rate and equilibrium based modeling with the sequential quadratic programming optimization method for glycol dehydration of produced natural gas. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(4), 745–756. <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00064-4>
- ONU. (2019). El Cambio Climático y la Pobreza. In *Consejo de Derechos Humanos* (Vol. 41, Issue 3). <https://doi.org/10.18268/bsgm1908v4n1x1>

- Panceri, J. (2019). Sustentabilidad:Economía, Desarrollo y Medioambiente. In *Editorial Biblios Politeia*.
- PNH. (2020). Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020-2024. In *Gobierno de México*. <http://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024%0Ahttps://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024%0Ahttp://files/301/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024.html>
- Quintana-Ashwell, N., Kaur, G., Singh, G., Gholson, D., Delhom, C., Krutz, L. J., & Hegde, S. (2021). Positive mathematical programming to model regional or basin-wide implications of producer adoption of practices emerging from plot-based research. *Agronomy*, *11*(11).
<https://doi.org/10.3390/agronomy11112204>
- Ramirez, B. A., González, 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.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Reyes Martínez, A., Castro Ramírez, J. C., & Martínez Atilano, G. (2019). Transferencia y conservación de la infraestructura hidroagrícola en el Alto Río Lerma, Guanajuato. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, *7*(20), 65–76.
<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.69247>
- 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 (Switzerland)*, *11*(4), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/w11040858>
- Rubiños-Panta, E., Palacios-Vélez, E., Martínez-Damián, M. Á., Valdivia-Alcalá, R., & Hernández-Acosta, E. (2004). Characterization of the Water Rights Market in Irrigation Districts. *Terra Latinoamericana*, *22*(2), 217–224.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322210>
- Sánchez, D. E., & Ramirez, N. L. (2017). Diseño de un modelo de programación

- lineal para la planeación de producción en un cultivo de fresa, según factores costo/beneficio y capacidades productivas en un periodo temporal definido. *Ingenierías USBMed*, 8(1), 7–11. <https://doi.org/10.21500/20275846.2564>
- Santos-Hernández, A. L., Palacios-Vélez, E., Exebio-García, A., & Chalita-Tovar, L. (2000). Metodología para evaluar la distribución de costos e ingresos relacionados con el servicio de riego. *Agrociencia*, 34(5), 639–649.
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724–9758. <https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- Shiva, V. (2003). Las guerras del agua. Privatización, consumo y lucro. In *Siglo XX Editores*.
- Speed, R., Yuanyuan, L., Le Quesne, T., Pegram, G., & Zhiwei, Z. (2013). *Basin Water Allocation Planning Cultural. Principles, Procedures and Approaches for Basin Allocation Planning*. <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/30247/basin-water-allocation-planning.pdf>
- Strange, T., & Bayley, A. (2012). Desarrollo Sostenible, Integrar la economía la sociedad y el medio ambiente. In *OCDE-Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM*. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264175617-es>
- Su, X., Li, J., & Singh, V. P. (2014). Optimal Allocation of Agricultural Water Resources Based on Virtual Water Subdivision in Shiyang River Basin. *Water Resources Management*, 28(8), 2243–2257. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0611-5>
- Sun, S. K., Wu, P. Te, Wang, Y. B., & Zhao, X. N. (2013). The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1427–1437. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5911>
- Tagle-Zamora, D., Caldera-Ortega, A. R., & Fuente-Carrasco, M. E. (2019). Regulation, public water management and market environmentalism in

- Mexico: An analysis from political projects. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 10(2), 1–30. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2019-02-01>
- Tang, Y., Zhang, F., Wang, S., Zhang, X., Guo, S., & Guo, P. (2019). A distributed interval nonlinear multiobjective programming approach for optimal irrigation water management in an arid area. *Agricultural Water Management*, 220(17), 13–26. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.052>
- Toan, T. D. (2016). Water Pricing Policy and Subsidies to Irrigation: a Review. *Environmental Processes*, 3(4), 1081–1098. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0187-6>
- Torres, S. L., Tijerina, L., Ibáñez, L. A., & Bautista, M. (2020). Optimización de recursos en la producción de forrajes distrito de riego 028 Tulancingo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, publicació*(24), 153–163. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i24.2366>
- van Dooren, C. (2018). A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Frontiers in Nutrition*, 5(48). <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00048>
- Vidal, A., & Asuaga, C. (2021). Gestión Ambiental en las Organizaciones: Una Revisión de la Literatura. *Revista Del Instituto Internacional de Costos*, 18, 84–122.
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., & Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Wong, C. Y., Foo, D. C. Y., & Sin, L. T. (2020). Design and Optimisation of Water Recovery System for a Polylactide Production Process. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4(2), 149–161. <https://doi.org/10.1007/s41660-020-00118-7>
- WWC. (2018). Striving for Water Security. Triennial Report 2016-2018. In *World Water Council*.
- Xu, M., & Li, C. (2019). Application of the water footprint: Water stress analysis and

- allocation. In *Application of the Water Footprint: Water Stress Analysis and Allocation*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0234-7>
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). Determining the Economic Value of Water. In *Resources for the Future (RFF) PRESS* (Second). <https://doi.org/10.4324/9780203784112>
- Zamani, O., Azadi, H., Mortazavi, S. A., Balali, H., Moghaddam, S. M., & Jurik, L. (2021). The impact of water-pricing policies on water productivity: Evidence of agriculture sector in Iran. *Agricultural Water Management*, 245(January), 106548. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106548>
- Zetland, D. (2021). The role of prices in managing water scarcity. *Water Security*, 12(November 2020), 100081. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100081>
- Zhang, C., & Guo, P. (2018). An inexact CVaR two-stage mixed-integer linear programming approach for agricultural water management under uncertainty considering ecological water requirement. *Ecological Indicators*, 92, 342–353. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.018>
- Zhou, Y., Yang, B., Han, J., & Huang, Y. (2019). Robust linear programming and its application to water and environmental decision-making under uncertainty. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/su11010033>

III. AGUA VIRTUAL Y TARIFAS EN LOS PRINCIPALES CULTIVOS DEL DISTRITO DE RIEGO 011, GUANAJUATO, MÉXICO.

VIRTUAL WATER AND RATES IN THE MAIN CROPS OF THE IRRIGATION DISTRICT 011, GUANAJUATO, MEXICO.

José Gilberto Cortés Ramírez^{1*}, Dixia Dania Vega Valdivia¹, Ramón Valdivia Alcalá², César Botello-Aguillón³, Juan Hernández Ortiz⁴.

(1,2,4) División de Ciencias Económico Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5. Carretera México-Texcoco. Chapingo. Estado de México. C.P. 56230. ³ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C.P. 56230

*Autor de correspondencia: J. Cortés [josegil.cortes92@gmail.com]

Artículo enviado a la Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.

3.1 Resumen

La política de precios actual no permite la recuperación completa de los costos de operación y mantenimiento del sistema de riego. Establecer una tarifa de agua adecuada podría fomentar el uso eficiente del recurso, la tecnificación del riego y la adopción de cultivos de mayor valor o menor consumo hídrico. Este estudio se centró en determinar la tarifa adecuada del agua por decámetros cúbicos (dam³) para la producción de cebada, maíz grano y trigo grano en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato. Mediante un enfoque cuantitativo, se analizaron datos de la cuota de riego, superficie sembrada, rendimiento de cultivos y lámina de riego en los diferentes módulos del distrito. Los resultados indicaron que la tarifa calculada varía según el cultivo y el módulo. En promedio, el maíz grano presentó la tarifa más alta (\$171.2/dam³), seguido de la cebada (\$74.1/dam³) y el trigo grano (\$66.1/dam³). Estos resultados sugieren que ajustar las cuotas de riego en función de la demanda podría contribuir a un mejor control del uso de agua. Así, el establecimiento de tarifas diferenciadas podría promover prácticas agrícolas sostenibles y una gestión más eficiente de los recursos hídricos en el contexto de demanda creciente.

Palabras clave: Eficiencia del agua, control de demanda, precio del agua.

3.2 Abstract

The current pricing policy does not allow for full recovery of the operation and maintenance costs of the irrigation system. Establishing an adequate water rate could encourage efficient use of the resource, irrigation technology, and the adoption of crops with higher value or lower water consumption. This study focused on determining the appropriate water rate per cubic decameter (dam^3) for the production of barley, grain corn, and grain wheat in Irrigation District 011 Alto Río Lerma, Guanajuato. Using a quantitative approach, data on the irrigation quota, planted area, crop yield, and irrigation depth in the different modules of the district were analyzed. The results indicated that the calculated rate varies according to the crop and module. On average, grain corn had the highest rate (\$171.2/ dam^3), followed by barley (\$74.1/ dam^3) and grain wheat (\$66.1/ dam^3). These results suggest that adjusting irrigation rates based on demand could contribute to better control of water use. Thus, the establishment of differentiated tariffs could promote sustainable agricultural practices and more efficient management of water resources in the context of increasing demand.

Keywords: Water efficiency, demand control, water price.

3.3 Introducción

La producción de casi todos los bienes requiere agua. El agua utilizada en el proceso de producción de un producto agrícola o industrial se denomina "agua virtual" contenida en el producto. Por ejemplo, para producir un kilogramo de cereales en condiciones de secano y clima favorable, se requieren entre uno y dos metros cúbicos de agua, es decir, entre 1,000 y 2,000 kg de agua. Sin embargo, en regiones áridas con altas temperaturas y alta evapotranspiración, esta cantidad aumenta a entre 3,000 y 5,000 kg de agua para producir la misma cantidad de cereales (Hoekstra & Hung, 2002).

La agricultura es el sector más vulnerable a la escasez de agua y, a la vez, el que ofrece mayores posibilidades de ajuste ante esta situación (Food Ang agriculture organization Of The United Nation, 2021). Dado que el agua es un recurso esencial para la producción de alimentos, actualmente el 70% del consumo de agua global (y el 75.7% en México) se destina a la agricultura. Por lo tanto, una política de manejo eficiente del agua resulta fundamental para alcanzar la seguridad alimentaria y reducir la pobreza (CONAGUA, 2021). La fijación de precios del agua representa una herramienta clave para la gestión de la demanda hídrica. Un análisis adecuado de los precios puede orientar a formuladores de políticas y administradores del agua hacia decisiones que maximicen el beneficio económico, social y ambiental, evitando la sobreexplotación del recurso (Griffin, 2006).

Conocer el valor económico del agua en la agricultura permite reconocer señales de escasez y evaluar el impacto de cambios en la disponibilidad hídrica sobre los beneficios económicos (Arreguín-Cortés *et al.* 2020). Zamani *et al.* (2021) demostraron que la institucionalización de una política de precios puede incentivar la adopción de tecnologías de riego eficientes, modificar patrones de cultivo y mejorar la productividad hídrica en condiciones controladas. Sin embargo, estos beneficios ambientales solo se materializan si existen políticas que eviten la expansión del área irrigada, controlando así el agotamiento de los acuíferos. Para ello, la aceptación pública de una tarifa efectiva requiere que las políticas prioricen la equidad social y la protección ambiental, promoviendo el "agua social" sobre el uso competitivo para fines económicos (Zetland, 2021).

En los países en desarrollo y muchos desarrollados, los subsidios aún dominan la irrigación, aunque se promueve cada vez más la recuperación de costos completos en el suministro de agua. Incorporar el costo de suministro, el costo económico y de recursos, y el costo ambiental en las políticas de precios del agua podría fomentar un desarrollo hídrico más sostenible y una mayor protección ambiental (Toan, 2016). Para medir la productividad hídrica es fundamental cuantificar el contenido de agua en la producción agrícola, dado que una mayor

eficiencia en el uso del agua implica reducir el consumo en la producción de cultivos. El concepto de agua virtual es una herramienta efectiva para la asignación racional de recursos hídricos regionales (Su *et al.*, 2014). Aunque tradicionalmente se han considerado asignaciones de agua física, estudios recientes integran conceptos de agua virtual y huella hídrica en modelos de optimización (Xu & Li, 2019).

En el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Guanajuato, se establece una cuota fija por hectárea regada que varía según el módulo de riego, independientemente del tipo de cultivo. Este estudio tiene como objetivo cuantificar el contenido de agua virtual empleado en la producción de cebada, maíz grano y trigo grano en los diferentes módulos de riego y calcular la tarifa por dam³ de agua utilizada para estos cultivos.

3.4 Materiales y métodos

3.4.1 Área de estudio

La presente investigación se realizó en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma (DR 011), ubicado en las coordenadas medias de 19° 55' N y 99° 39' O (Exebio-García *et al.*, 2005), a una altitud de 1,722 metros sobre el nivel del mar. El clima de la región, clasificado según el sistema de Köppen y modificado por García (2004), es semicálido subhúmedo [(A)C(wo)] y [(A)C(w1)], caracterizado por lluvias en verano, con una precipitación media anual de 744.4 mm y una temperatura promedio mensual entre 18 y 20 °C. El período de heladas se extiende de noviembre a febrero, con una frecuencia de entre 10 y 30 días al año, mientras que las granizadas ocurren entre una y tres veces anualmente (Mejía-Saenz *et al.*, 2003). Este distrito forma parte de la cuenca hidrológica Lerma-Chapala, una región clave en México que contribuye con el 30% de la producción industrial y el 12.5% de la producción agrícola del país. Aproximadamente el 75% de los recursos hídricos de esta cuenca se destinan a la agricultura y la ganadería (Fernández-Durán & Lloret, 2016).

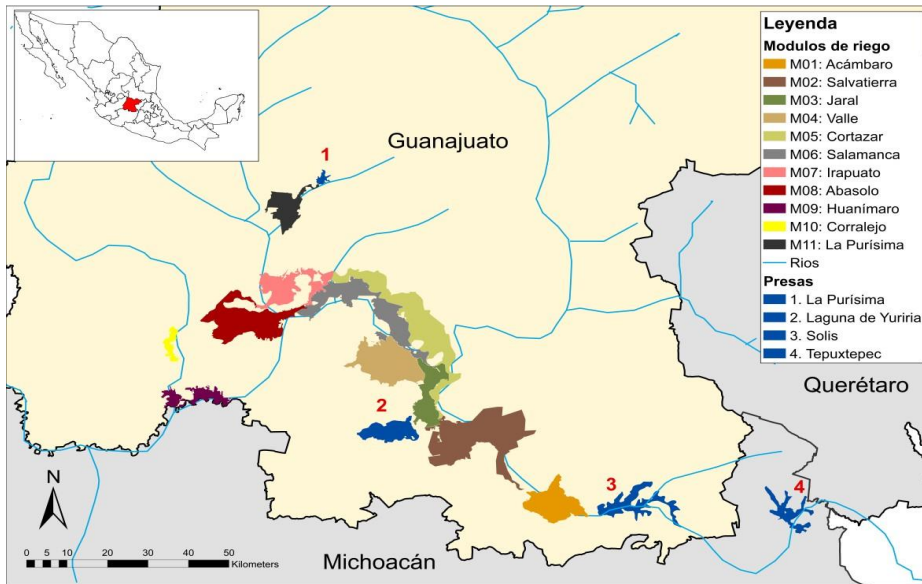


Figura 1. Mapa del Distrito de Riego 011, Alto Rio Lerma (Rodríguez-Flores et al., 2019)

Estimación de Tarifas de Agua en el Distrito de Riego 011

Los datos sobre tarifas aplicadas, superficie sembrada, lámina de riego y rendimiento de cultivos en los 11 módulos de riego del Distrito de Riego 011 corresponden al ciclo agrícola 2021-2022 y fueron proporcionados por la administración del distrito. Para evaluar el consumo de agua, se empleó el método de equilibrio parcial del sector agrícola, que permite calcular el contenido de agua virtual real comparando la cantidad de agua asignada con la necesaria según las necesidades hídricas de los cultivos seleccionados.

El costo del agua consumida para producir una tonelada de un cultivo específico i (C_i) se calculó dividiendo el costo del agua por hectárea, o la tarifa actual del módulo (TA_i), entre el rendimiento del cultivo en toneladas por hectárea (X_i), según la siguiente fórmula:

$$C_i = \frac{TA_i}{X_i} = \frac{MXN\$/ha}{t/ha} = \frac{MXN\$}{t} \quad (1)$$

El concepto de "agua virtual" fue introducido por Tony Allan en 1993, definiéndolo como el volumen de agua necesario para producir un bien. Este concepto es fundamental en la formulación de políticas para la eficiencia hídrica y la gestión sostenible en zonas con escasez de agua o propensas a la sequía (Hoekstra & Chapagain, 2007; Marston & Konar, 2017). La cantidad de agua virtual de un cultivo específico depende del tipo de cultivo, condiciones geográficas, sistema de riego y prácticas de manejo, y se expresa mediante la demanda de agua del cultivo i (W_i) dividida entre su rendimiento (X_i):

$$Q_i = \frac{W_i}{X_i} = \frac{\text{dam}^3/\text{ha}}{\text{t/ha}} = \frac{\text{dam}^3}{\text{t}} \quad (2)$$

La tarifa por dam^3 de agua se obtiene dividiendo el costo del agua por tonelada de cultivo i (C_i) entre la cantidad de agua consumida para producir dicha tonelada (Q_i):

$$TC_i = \frac{C_i}{Q_i} = \frac{\text{MXN}\$/\text{t}}{\text{dam}^3/\text{t}} = \frac{\text{MXN}\$}{\text{dam}^3} \quad (3)$$

En el Distrito de Riego 011, los principales cultivos son cebada, maíz grano y trigo grano, que representan el 63.5% de la superficie sembrada. La cebada abarca el 22.3%, el maíz grano el 25.2% y el trigo grano el 16.0% del área total cultivada (Tabla 1).

Tabla 2. Superficie sembrada, rendimiento y lámina de riego de los principales cultivos por modulo

Módulos	Cebada			Maíz grano			Trigo grano		
	ha	t/ha	dam^3	ha	t/ha	dam^3	ha	t/ha	dam^3
M01 Acámbaro	23.76	5.8	14.27	5297	12	6.29	5.99	6.5	11.8
M02 Salvatierra	954.7	6	12.8	4225.2	12	9.43	1084	6	15.4
M03 Jaral	1968.6	5.22	8.6	2097.9	12	5.54	113	6	10.5
M04 Valle	4683.1	7	11.02	3767.7	12.9	5.93	472	6.8	12.6

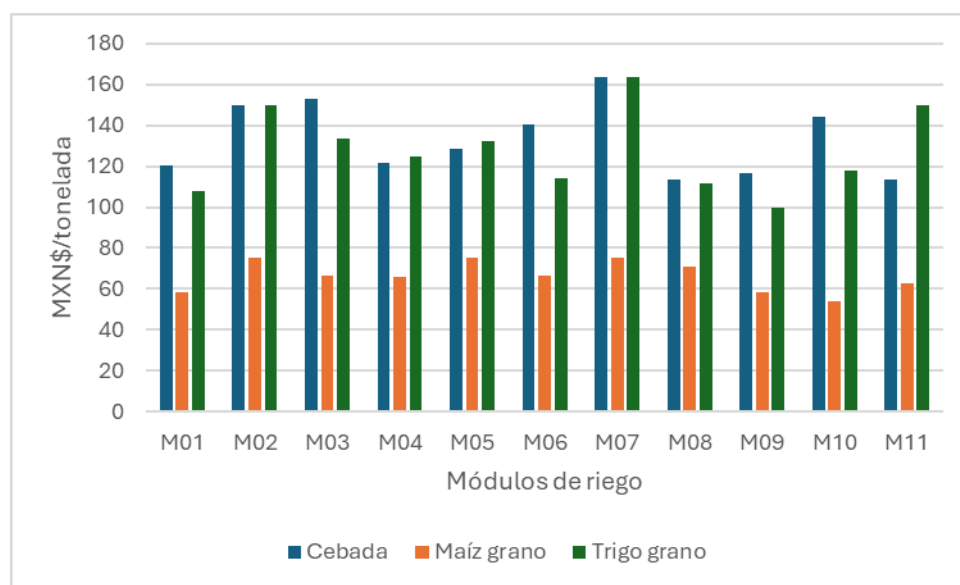
M05 Cortazar	3845.5	7	8.7	3126.2	12	4.91	3782	6.8	10.5
M06 Salamanca	3035.6	5.7	10.08	2939.5	12	4.63	3290	7	10.5
M07 Irapuato	1095.9	5.5	12.13	801.95	12	5.14	1057	5.5	13.6
M08 Abasolo	5512.7	6.87	7.51	5048	12	3.45	4350	7	9.4
M09 Huanímaro	88.22	6	11.06	2016	12	3.82	2314	7	11.2
M10 Corralejo	115.97	4.5	20.11	801.76	12	2.51	312	5.5	19.4
M11La purísima	1001.4	6.62	10.66	1584.2	12	3.91	1923	5	12.3
Total	22325		127.05	31706		55.62	18708		137

Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el DR 011.

3.5 Resultados y Discusión

El costo promedio del agua utilizada para producir una tonelada de cebada fue de \$133.26/ton, seguido por el trigo grano con \$127.81/ton y el maíz grano con \$66.2/ton. La cebada, al ser el cultivo con el rendimiento más bajo, presenta el costo más elevado debido a la cuota uniforme que se aplica a todos los cultivos (Figura 2).

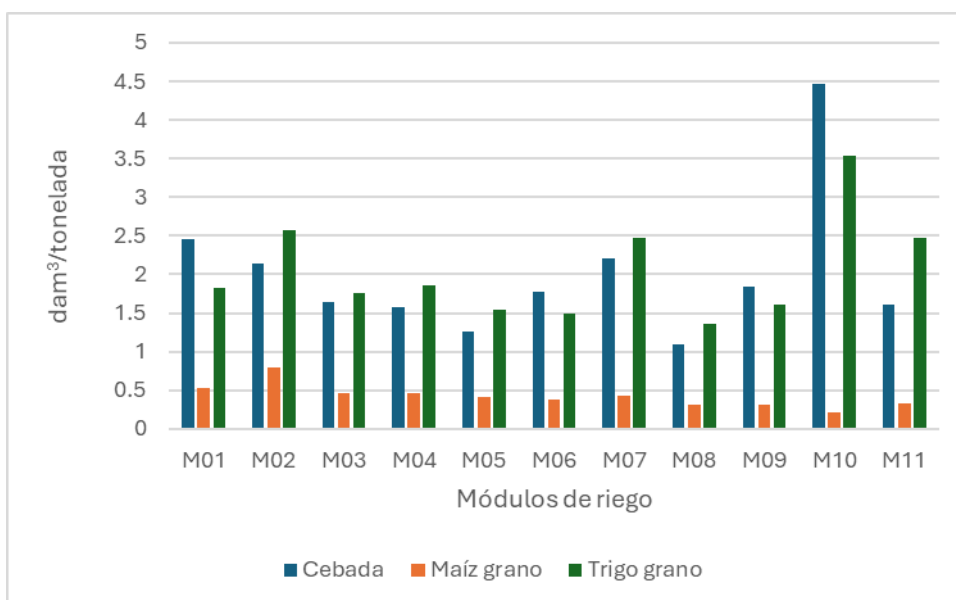
Figura 2. Costo del agua para producir una tonelada de cultivo



Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el DR 011.

El contenido de agua virtual por tonelada es más elevado en el cultivo de trigo grano, seguido de la cebada y finalmente del maíz grano, con promedios de 2.04 dam³/ton, 2.00 dam³/ton y 0.42 dam³/ton, respectivamente. Aunque el maíz grano presenta la lámina neta más baja (5.05 dam³) en comparación con el trigo grano (12.5 dam³) y la cebada (11.5 dam³), su rendimiento es el más alto entre los tres cultivos (Figura 3).

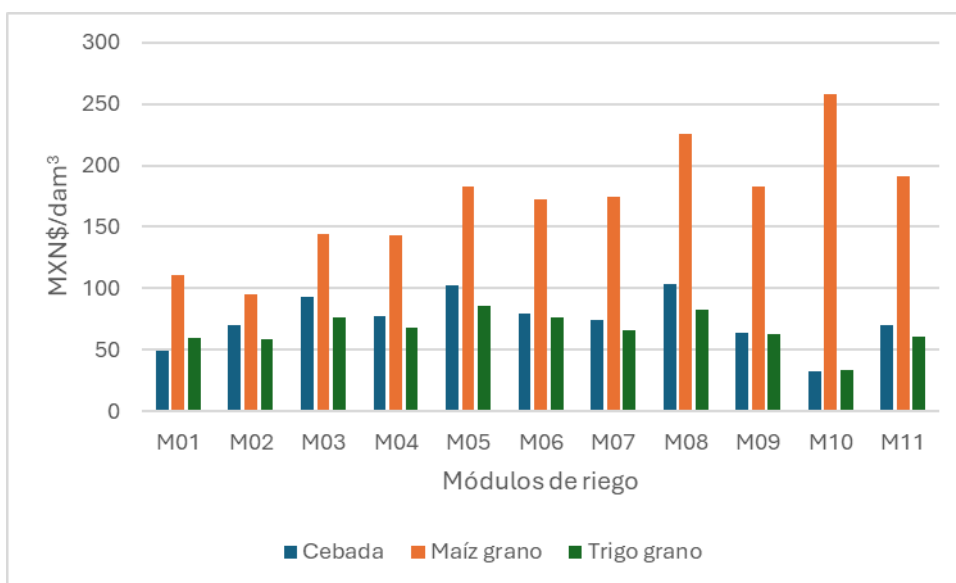
Figura 3. Cantidad de agua consumida para producir una tonelada de cultivo



Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el DR 011.

La tarifa promedio calculada por dam³ de agua utilizada en la producción de maíz grano es de \$171.2. Las tarifas más elevadas se registraron en los módulos 10 (\$258.33) y 08 (\$225.72). Cabe destacar que el módulo 08, a pesar de ser el tercero en superficie sembrada de maíz grano, muestra el menor rendimiento del distrito. Los módulos 01, 02, 04 y 08 concentran las mayores áreas sembradas de maíz grano, debido en parte a que presentan tarifas relativamente bajas por dam³ de agua. En cuanto a la cebada, la tarifa promedio calculada por dam³ de agua es de \$70.1. El módulo 08 tiene la tarifa más alta, con \$103.8, mientras que el módulo 10 registra la tarifa más baja del distrito, con \$32.3. Este último módulo ofrece el costo más reducido de agua para la producción de cebada en toda la región.

Figura 4. Tarifa calculada por dam^3 de agua



Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por el DR 011.

El contenido de agua virtual más bajo para maíz grano se encontró en el módulo 10, con $0.2096 \text{ dam}^3/\text{ton}$, mientras que el promedio del distrito fue de $0.420 \text{ dam}^3/\text{ton}$, valor similar a los reportados en Países Bajos ($0.408 \text{ dam}^3/\text{ton}$) y Estados Unidos ($0.489 \text{ dam}^3/\text{ton}$). El contenido de agua virtual más alto se registró en el módulo 02, con $0.7875 \text{ dam}^3/\text{ton}$, comparable con los niveles de China ($0.808 \text{ dam}^3/\text{ton}$) y Australia ($0.744 \text{ dam}^3/\text{ton}$), aunque aún por debajo del promedio mundial de $0.909 \text{ dam}^3/\text{ton}$.

A nivel global, el maíz muestra un contenido de agua virtual menor que cultivos como el arroz ($3.419 \text{ dam}^3/\text{ton}$), trigo ($1.334 \text{ dam}^3/\text{ton}$), soya ($1.789 \text{ dam}^3/\text{ton}$) y café ($17.363 \text{ dam}^3/\text{ton}$) (Hoekstra & Chapagain, 2007). La cuantificación del agua virtual proporciona una medida de la eficiencia hídrica en la producción agrícola (Xu & Li, 2019). Incrementar la productividad del agua en la producción de cereales implica reducir el contenido de agua virtual (Sun et al., 2013).

Las tarifas que pagan los productores varían entre módulos de riego debido a factores como los costos de suministro. En módulos de menor extensión, los

costos unitarios de suministro tienden a ser más altos, lo cual eleva el precio por metro cúbico de agua (Santos-Hernández *et al.*, 2000). Este incremento en el costo puede motivar a los productores a optar por cultivos más rentables en lugar de aquellos que demandan altos volúmenes de agua. En contraste, en módulos donde la tarifa de riego es baja, la tarifa calculada por cada mil metros cúbicos también disminuye. Esto significa que, si la cuota actual de riego permanece constante mientras aumenta la demanda de agua, la tarifa efectiva por unidad de agua seguirá reduciéndose.

Incrementar las cuotas de riego a medida que crece la demanda podría mitigar estos efectos. Aunque la tarifa aplicada sea uniforme dentro de un módulo, la tarifa calculada varía entre cultivos; en promedio, es mayor para el maíz grano, seguido de la cebada y el trigo grano. Se anticipa que un aumento en las tarifas de riego inducirá cambios en los patrones de cultivo, métodos de riego y tecnologías de ahorro hídrico (Zetland, 2021), a diferencia de lo encontrado por Hernández Pérez *et al.* (2024), ya que en el distrito de riego 003 la baja calidad del agua impide que se produzcan cultivos de alta rentabilidad y con requerimientos de agua de mayor calidad; por lo que un incremento en las tarifas del agua no provocaría una reconversión de cultivos. La combinación de políticas de precios con otros instrumentos, como la negociación de excedentes hídricos o el uso de mercados de agua, podría optimizar los resultados para los productores (Bosworth *et al.*, 2002).

3.6 Conclusiones

Este estudio indica que las tarifas del agua necesarias para producir una tonelada de cebada, maíz grano y trigo grano varían entre los diferentes módulos de riego. En general, la tarifa calculada para el maíz grano es más alta que la de la cebada y el trigo grano en todos los módulos, especialmente en aquellos que utilizan sistemas de bombeo.

La aplicación de una tarifa uniforme por hectárea regada tiende a incentivar la producción de cultivos de alto consumo de agua y bajo valor económico. En este contexto, aumentar las tarifas de agua podría fomentar la transición hacia cultivos de mayor valor económico o con una mayor eficiencia hídrica. Sin embargo, es importante considerar el impacto en los pequeños productores, ya que los cultivos más rentables suelen requerir niveles más altos de inversión, lo cual puede representar una barrera para quienes disponen de recursos limitados.

3.7 Literatura citada

- Arreguín-Cortés, F. I., López-Pérez, M., & Cervantes-Jaimes, C. E. (2020). Los retos del agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 11(2), 341–371. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-10>
- Bosworth, B., Cornish, G., Perry, C., & Steenbergen, F. van. (2002). Water Charging in Irrigated Agriculture; Lessons from the literature. In *HR Wallingford* (Issue Report OD 145).
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021. In *Comisión Nacional del Agua*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2021.pdf
- Exebio-García, A., Palacios-Vélez, E., Mejía-Saen, E., & Ruiz-Carmona, V. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 213–223.
- Fernández-Durán, J. J., & Lloret, A. (2016). Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma-Chapala. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 129–138.
- Food Ang agriculture organization Of The United Nation. (2021). THE STATE OF THE WORLD´S LAND AND WATER RESOURCES FOR FOOD AND AGRICULTURE. In *FAO*. <https://doi.org/10.4060/cb7654en>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (Núm. 5). <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>
- Griffin, R. C. (2006). *Water Resource Economics. The Analysis of Scarcity*,

- Policies, and Projects. In *The MIT Press*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2479-2>
- Hernández Pérez, J., Hernández Ortiz, J., Valdivia Alcalá, R., & Arana Coronado, O. A. (2024). Tarifas y Agua Virtual en Tres Cultivos del Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo, México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 7507–7519. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i6.9291
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9039-x>
- Hoekstra, A. Y., & Hung, P. Q. (2002). Virtual water trade. A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade. In *IHE DELFT* (Issue 11). <https://doi.org/10.4324/9780203867785-15>
- Marston, L., & Konar, M. (2017). Drought impacts to water footprints and virtual water transfers of the Central Valley of California. *AGU Water Resources Research*, 5(55), 5756–5773. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Mejía-Saenz, E., Palacios-Vélez, E., Chávez-Morales, J., Zazueta-Ranahan, F., Tijerina-Chávez, L., & Casas-Díaz, E. (2003). EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO DE RIEGO 011 ALTO RÍO LERMA , GUANAJUATO , MÉXICO. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 523–531. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321408>
- 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 (Switzerland)*, 11(4), 1–23. <https://doi.org/10.3390/w11040858>
- Santos-Hernández, A. L., Palacios-Vélez, E., Exebio-García, A., & Chalita-Tovar, L. (2000). Metodología para evaluar la distribución de costos e ingresos relacionados con el servicio de riego. *Agrociencia*, 34(5), 639–649.
- Su, X., Li, J., & Singh, V. P. (2014). Optimal Allocation of Agricultural Water Resources Based on Virtual Water Subdivision in Shiyang River Basin. *Water*

- Resources Management*, 28(8), 2243–2257. <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0611-5>
- Sun, S. K., Wu, P. Te, Wang, Y. B., & Zhao, X. N. (2013). The virtual water content of major grain crops and virtual water flows between regions in China. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(6), 1427–1437. <https://doi.org/10.1002/jsfa.5911>
- Toan, T. D. (2016). Water Pricing Policy and Subsidies to Irrigation: a Review. *Environmental Processes*, 3(4), 1081–1098. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0187-6>
- Xu, M., & Li, C. (2019). Application of the water footprint: Water stress analysis and allocation. In *Application of the Water Footprint: Water Stress Analysis and Allocation*. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-0234-7>
- Zamani, O., Azadi, H., Mortazavi, S. A., Balali, H., Moghaddam, S. M., & Jurik, L. (2021). The impact of water-pricing policies on water productivity: Evidence of agriculture sector in Iran. *Agricultural Water Management*, 245(January), 106548. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106548>
- Zetland, D. (2021). The role of prices in managing water scarcity. *Water Security*, 12(November 2020), 100081. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100081>

IV. VALORACIÓN ECONÓMICA DEL AGUA DE USO AGRÍCOLA BAJO ESCENARIOS DE ESCASEZ EN EL SURESTE DE GUANAJUATO ECONOMIC VALUATION OF WATER FOR AGRICULTURAL USE UNDER SCARCITY SCENARIOS IN SOUTHEAST GUANAJUATO

José Gilberto Cortés Ramírez¹, Dixia Dania Vega Valdivia¹, Ramón Valdivia Alcalá², César Botello Aguillón³, Juan Hernández Ortiz⁴

(1, 2, 4) División de Ciencias Económico Administrativas de la Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5. Carretera México-Texcoco. Chapingo. Estado de México. C.P. 56230.

³Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo, Texcoco, Estado de México, México, C.P. 56230 *Autor de correspondencia: J. Cortés [josegil.cortes92@gmail.com]

Artículo enviado a la Revista Ecosistemas de la Asociación Española de Ecología Terrestre

4.1 RESUMEN

La agricultura es el sector con mayor uso consuntivo en el mundo de aguas superficiales y subterráneas, razón por la cual resulta necesario la determinación de su precio económico. El objetivo de la presente investigación fue determinar el valor del producto marginal (precio sombra) del agua de uso agrícola, así como evaluar la viabilidad de un mercado de agua entre los módulos seleccionados como mecanismo para enfrentar la escasez de agua. Se utilizó un modelo de programación lineal con restricciones de tierra y agua, posteriormente se analizaron distintos escenarios con disminución de la disponibilidad de agua. Los resultados indican que el precio sombra promedio del agua superficial es \$2.155/m³, que es muy superior a los \$0.235/m³ que se pagan en la zona de estudio cuando la disponibilidad de agua es del 100%, y de \$2.723/m³ y \$3.129/m³, cuando la disponibilidad es del 75% y 50% respectivamente. Respecto al agua de pozo, la tarifa promedio pagada por los agricultores fue de \$0.588/m³, los precios sombra proporcionados por el modelo fueron de \$6.819/m³, \$8.774/m³ y \$9.89/m³ para el 100%, 75% y 50% de disponibilidad de agua respectivamente. En presencia de un mercado de agua, se tiene mayor eficiencia del agua y se perciben mayores ingresos en la producción de cultivos que cuando no existe un

mercado. Es recomendable que las tarifas sean definidas tomando como referencia el valor del producto marginal del agua, el cual debe ajustarse con base en los cambios periódicos del nivel de agua.

Palabras clave: Mercado de agua, tarifas eficientes, programación lineal.

4.2 ABSTRACT

Agriculture is the sector with the greatest consumptive use of surface and groundwater in the world, which is why it is necessary to determine its economic price. The objective of this research was to determine the value of the marginal product (shadow price) of water for agricultural use, as well as to evaluate the viability of a water market among the selected modules as a mechanism to address water scarcity. A linear programming model was used with land and water restrictions; later, different scenarios with decreased water availability were analyzed. The results indicate that the average shadow price of surface water is \$2.155/m³, which is much higher than the \$0.235/m³ paid in the study area when water availability is 100%, and \$2.723/m³ and \$3.129 /m³, when availability is 75% and 50% respectively. Regarding well water, the average rate paid by farmers was \$0.588/m³, the shadow prices provided by the model were \$6.819/m³, \$8.774/m³ and \$9.89/m³ for 100%, 75% and 50% of water availability respectively. In the presence of a water market, there is greater water efficiency and greater income is received from crop production than when there is no market. It is recommended that rates be defined taking as reference the value of the marginal product of water, which must be adjusted based on periodic changes in the water level.

Keywords: Water market, efficient rates, linear programming.

4.3 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, México enfrenta problemas de escasez de agua en gran parte de su territorio, debido principalmente a la insuficiencia de lluvias y escurrimientos superficiales, a la falta de infraestructura para la captación, tratamiento de aguas residuales, conducción y entrega con el volumen y la continuidad que la demanda exige (CONAGUA, 2021). Otro gran problema es la sobreexplotación de los acuíferos y cuerpos de aguas superficiales, ineficiencia y contaminación del agua (Dai & Li, 2013).

El Estado de Guanajuato es uno de los principales productores agrícolas de México, y el sector agrícola representa una parte importante de su economía, asimismo, ha sido una de las zonas que más se ha industrializado. Sin embargo, la región es semiárida y sufre una escasez crónica de agua debido a la falta de precipitaciones y la sobreexplotación de los acuíferos subterráneos. Además, la población del estado ha aumentado significativamente en las últimas décadas, lo que ha agravado la escasez de agua (Bravo Pérez et al., 2005).

En Guanajuato el agua subterránea es la fuente de seis de cada siete litros que se consumen para todos los usos, aunque particularmente para el uso doméstico representa el 99%, para el uso agrícola el 60% y para el industrial el 100% (Foster et al., 2005). Los acuíferos que mayor oferta de agua superficial tienen son: Irapuato-Valle, Pénjamo-Abasolo y Valle de Celaya; mientras que mayor oferta de agua subterránea poseen son: Irapuato-Valle, Valle de Celaya y Silao-Romita (CONAGUA et al., 2015). El acuífero Irapuato-Valle presenta un déficit de 163 millones de metros cúbicos (m^3), posicionándose como el segundo de los acuíferos con mayor sobreexplotación de la entidad. El usuario agrícola extrae el 85% del agua frente al 12% del uso público del agua (CEAG, 2021).

El problema de sobreexplotación de acuíferos en Guanajuato se agudiza debido a la baja eficiencia en el uso del recurso y a la contaminación de las fuentes de abastecimiento, los cuales desde hace tiempo son causa de efectos económicos negativos directos sobre la producción agrícola, y problemas de subsidencia

principalmente en zonas urbanas de Irapuato y Salamanca, por lo que, se requieren alternativas de solución que pueden darse mediante recomendaciones de política que contribuyan a hacer más eficiente y racional el uso del vital líquido (Guzmán-Soria et al., 2009).

Las pérdidas del agua en los distritos de riego que cuentan con presas de almacenamiento, tramo de río, redes y sistemas de aplicación del agua en parcela, son las siguientes: evaporación en el vaso de almacenamiento, en los canales a cielo abierto y en las parcelas; filtraciones en las redes de conducción y en la distribución; fugas y desfuegos, y percolación y escurrimiento en las parcelas (Reyes Martínez et al., 2019). En la agricultura de riego persisten pérdidas de agua del orden del 40%, además de problemas relacionados, por ejemplo, con el uso de volúmenes excesivos para riego de los cultivos e ingresos insuficientes para operación y mantenimiento (PNH, 2020).

En cuanto al problema de escasez de agua, éste se ha manejado tradicionalmente por el lado de la oferta, es decir, por medio de la construcción de infraestructura hidráulica, lo que ha evitado que el desabasto de agua sea aún más grave, es hasta hace relativamente poco que, se ha insistido en ejercer un mayor control de la demanda de agua, a través del uso de instrumentos económicos para lograr su uso eficiente (Castro et al., 2017; PNH, 2020).

La Organización para la Agricultura y Alimentos (FAO) define gestión de la demanda como *“las acciones que controlan la demanda, aumentando la eficiencia económica del uso del agua o reasignando el recurso hídrico dentro de cada sector y entre los distintos sectores”* (FAO, 2013). Una manera de gestionar la demanda de agua es a través de los precios, para ello existen diferentes herramientas que permiten hacer un análisis sobre precios óptimos. De modo que, al conocer el valor del agua en la agricultura, los formuladores de políticas, administradores del agua y todos aquellos individuos involucrados en la gestión del agua, puedan seleccionar la mejor decisión de financiamiento y distribución del

recurso, asignándolo a donde se obtenga un mayor beneficio económico, social y ambiental, previniendo la sobreexplotación (Chambers, 1988; Griffin, 2006; Harou et al., 2009; Young & Loomis, 2014).

Es importante mencionar que el uso de herramientas económicas no equivale a defender los mercados del agua como mecanismo para asignar todos los recursos hídricos; ni supone la privatización (Chong & Sunding, 2006). En este sentido, el objetivo de la presente investigación fue calcular el precio económico del agua de uso agrícola, así como la viabilidad de un mercado de agua bajo escenarios de escasez para los módulos de Abasolo (08), Irapuato (07) y Salamanca (06) pertenecientes al Distrito de Riego 011 (DR 011), Alto Río Lerma, en el Estado de Guanajuato. La hipótesis plantea que, un precio económico en el agua de uso agrícola puede tener un impacto positivo en la gestión sostenible del agua y en la productividad de los cultivos.

Un precio económico del agua de uso agrícola en Guanajuato puede equilibrar la necesidad de conservación y uso eficiente del agua con la necesidad de garantizar el acceso al agua para los agricultores. Esto puede ayudar a fomentar prácticas agrícolas más sostenibles y a apoyar la producción de alimentos en el estado. Además, un precio económico del agua también puede generar ingresos que pueden ser reinvertidos en la gestión sostenible del agua y en la promoción de prácticas agrícolas más sostenibles.

4.4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.4.1 Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma (DR 011), cuyas coordenadas geográficas medias son 19° 55' N y 99° 39' O (Exebio-García et al., 2005), a una altitud de 1.722 m.s.n.m. Forma parte de la cuenca

hidrológica Lerma-Chapala, que concentra el 30% de la producción industrial y el 12.5% de la producción agrícola del país; además de que el 75% de su agua es destinada a la agricultura y la ganadería (Fernández-Durán & Lloret, 2016).

4.4.2 Modelo de programación lineal

Los modelos de Programación Matemática más utilizados son la programación lineal y cuadrática, pues abarcan cualquier tipo de actividad humana como finanzas (Mussafi & Ismail, 2021), economía ambiental (Sheffield et al., 2018), elaboración de dietas (van Dooren, 2018), economía de la energía (McLarty et al., 2019), química (Okoro et al., 2020), por supuesto agronomía (Sánchez & Ramirez, 2017; Quintana-Ashwell et al., 2021), entre otras.

En cuanto a economía del agua, los modelos de programación matemática son utilizados con mayor frecuencia para cuantificar los beneficios de los cambios en la asignación o calidad del agua para la producción agrícola (Rubiños-Panta et al., 2004; Li et al., 2018) o industrial (Wong et al., 2020; Kung & Wu, 2021), considerando objetivos administrativos, económicos y ecológicos, con la finalidad de maximizar ingresos netos, sujetos a la restricción de la disponibilidad de recursos o acuerdos institucionales. De acuerdo con Daghighi et al. (2017), los modelos de programación lineal sirven para determinar la asignación óptima de los recursos escasos, con la finalidad de reducir el consumo de agua e incrementar la producción en planes de gestión de recursos hídricos, también ayudan a maximizar el beneficio económico neto agregado del uso del agua en el sistema.

Para la consecución de los objetivos planteados, se generó una base de datos tomando en cuenta tres de los once módulos del distrito de riego, el módulo 06 (M06): Salamanca, el módulo 07 (M07): Irapuato y el módulo 08 (M08): Abasolo. Para desarrollar el modelo se utilizaron los siguientes datos por modulo: patrones de cultivos (los más representativos), uso del agua, rendimientos, costos de producción y precios medios rurales, siendo estos los factores que determinan la heterogeneidad de los módulos y por lo tanto las diferencias en la productividad

marginal del agua entre un módulo y otro, dicha información fue proporcionada por la Sociedad de Responsabilidad Limitada del DR 011. En la tabla 1 se observan algunos de los cultivos seleccionados para cada módulo con su respectiva superficie y volumen de agua requerido para su producción.

Tabla 2. Superficie sembrada y volumen de agua de los cultivos seleccionados por módulo

Cultivo	Área	Vol.	Cultivo	Área	Vol.	Cultivo	Área	Vol.
M06	(ha)	(dam ³)	M07	(ha)	(dam ³)	M08	(ha)	(dam ³)
Brócoli	256.8	2103.2	Ajo	46.35	292.9	Avena F.	36.89	423.31
Cebada	408.4	2692.7	Avena F.	7.81	73.98	Brócoli	137.2	880.5
Cebolla	173.9	1090.7	Cebolla	112.4	1188.5	Cebada	1394	10250
Cilantro	2.28	28.88	Brócoli	191.7	1671	Tomatillo	53	237.41
Coliflor	14	30.89	Cebada	939.6	6273.7	Trigo	775.3	6004
Garbanzo	58.57	153.91	Cebolla	112.4	1188.5	Alfalfa	48.15	702.1
Lechuga	127	1402.8	Lechuga	143.2	1463.8	Garbanzo	11	27.34
Trigo	355.6	3154.9	Trigo	688.2	6714.4	Maíz	312.9	586.9
Maíz	376.4	877.9	Frijol A.	11	52.88	Sorgo	226.2	464.9
Sorgo	114.6	257.1	Alfalfa	255.6	248.9	Espárrago	130	474.8
Alfalfa	277	1372.4	Espárrago	465.2	2884.17	Fresa	67.33	821.9
Espárrago	474	1720.6	Fresa	400.1	3669.8	Maíz sc	1615.9	3824.9
Maíz sc	828.8	2906.8	Maíz sc	1128.4	4556.8	Sorgo sc	355	736.1
Sorgo sc	463.6	1242.9	Sorgo sc	1020.7	3879.2			

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por el DR 011

Con la información recabada se formuló un modelo de programación lineal en el que se realizó la asignación del recurso entre las distintas actividades empleadas en la región, para obtener la productividad marginal del recurso. Dicho modelo tuvo como función objetivo maximizar el ingreso neto total (INT) con relación al volumen de riego total por cultivo de los productores de los módulos 06, 07 y 08. El ingreso neto se obtuvo de multiplicar el rendimiento por el precio medio rural (PMR) y posteriormente restarle los costos de producción sin incluir los salarios por el uso de fuerza de trabajo, renta de la tierra y precio del agua. El modelo está

sujeto a varias restricciones: disponibilidad de tierra cultivable (ha), al agua de riego (dam³), así como restricciones de máximos de superficie por cultivo (ha).

Con base en Kaiser & Messer (2011), el modelo de programación se expresó de la siguiente manera:

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

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^I a_i X_i \leq T_{OI} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J a_j X_j \leq T_{PV} \quad (3)$$

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

$$\sum_{l=1}^L a_l X_l \leq T_{SC} \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^I b_i X_i \leq A_{OI} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J b_j X_j \leq A_{PV} \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^K b_k X_k \leq A_{PE} \quad (8)$$

$$\sum_{l=1}^L b_l X_l \leq A_{SC} \quad (9)$$

$$X_i, X_j, X_k \geq 0 \quad (10)$$

Donde

INT es el ingreso neto total

c_i, c_j, c_k, c_l son el ingreso neto de las actividades de producción en el ciclo otoño-invierno, primavera-verano, perennes y segundos cultivos, respectivamente.

X_i, X_j, X_k, X_l son los valores por obtener de las superficies optimas a sembrar de cada cultivo en los ciclos otoño-invierno, primavera-verano, perennes y segundos cultivos.

a_i, a_j, a_k, a_l son los coeficientes técnicos necesarios para producir una unidad del cultivo.

b_i, b_j, b_k, b_l son la cantidad del recurso agua necesario para producir una unidad del cultivo.

$T_{OI}, T_{PV}, T_{PE}, T_{SC}$ son las superficies sembradas máximas de los ciclos otoño-invierno, primavera-verano, perennes y segundos cultivos del año agrícola.

A_{OI} , A_{PV} , A_{PE} , A_{SC} son el volumen neto total de agua disponible en los ciclos otoño-invierno, primavera-verano, perennes y segundos cultivos del año agrícola.

El modelo base se construyó con restricciones de agua superficial (riego por gravedad) y restricciones de agua de pozo (riego por bombeo), adicionalmente, se establecieron restricciones de superficies máximas cultivadas, de modo que el modelo represente lo más posible las condiciones normales en los módulos seleccionados.

Tabla 3. Restricciones de recursos para el modelo base

RIEGO	CICLO	M06		M07		M08	
		Tierra (ha)	Agua (dam ³)	Tierra (ha)	Agua (dam ³)	Tierra (ha)	Agua (dam ³)
GRAVEDAD (SUPERFICIAL)	O-I		65,540.7		27,877.8		83,111.5
	P-V	14,879	176.9	4,664	108.25	17,774	
	PE		11,010.1		6524.3		6,135.58
	SC		26,697.1		9,509.84		24,592.9
BOMBEO (POZOS)	O-I		10,444		19,109		17,380
	P-V		1,274		1,613		1,051
	PE	3,856.6	3,276	5,451.7	22,745	5,014	1,998.9
	SC		4,215		8,520.8		4,571
TOTAL		18,736	122,633	10,115	96,008	22,788	138,840

Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por el DR 011

Una vez conformado el modelo base, se plantearon 2 escenarios con escasez de agua, cambiando únicamente la disponibilidad (A_t) en 75% y 50%; y sin intercambio de agua superficial entre módulos. Del mismo modo, se construyeron modelos con los mismos escenarios de escasez, pero contemplando el intercambio de agua entre módulos (mercado de agua). El resto de las restricciones de superficie sembrada, así como máximos de cultivos se mantuvieron constantes. Todos los modelos de programación lineal fueron procesados con el software LINGO 20.0 (Linear Interactive and General Optimizer).

4.5 RESULTADOS

Una vez resuelto el modelo base, se obtuvo la productividad marginal del agua. Es importante mencionar que el hecho de que los precios sombra del recurso hayan alcanzado un valor de cero, no significa que el recurso se haya agotado por completo y, por lo tanto, sea gratuito. La tarifa promedio pagada por los agricultores en el año 2021-2022 fue de \$800.00 MN por hectárea de riego con agua superficial.

Considerando que una hectárea de riego tiene una distribución volumétrica media de 3,400 m³, resulta en un pago \$235.00/dam³ o bien \$0.235/m³, el cual es inferior al precio sombra \$2.155/m³ proporcionado por el modelo cuando la disponibilidad de agua es del 100%, y de \$2.723/m³ y \$3.129/m³, cuando la disponibilidad es del 75% y 50% respectivamente.

En cuanto al agua de pozo, que es agua de mayor calidad y productividad que el agua superficial y por tanto más costosa, la tarifa promedio pagada por los agricultores fue de \$588.23/dam³ o bien \$0.588/m³, los precios sombra proporcionados por el modelo fueron de \$6.819/m³, \$8.774/m³ y \$9.89/m³ para el 100%, 75% y 50% de disponibilidad de agua respectivamente.

Tabla 4. Precios sombra del agua por gravedad (\$MN/dam³) para cada modulo

Disponibilidad	100%			75%			50%		
Modulo	M06	M07	M08	M06	M07	M08	M06	M07	M08
AGUA									
O-I	0	6796.1	10268	0	6796.1	10268	0	6796.1	10268
P-V	0	0	3336.4	0	3773.9	3336.4	0	5837.4	3336.4
Perennes	40.91	310.83	1167.5	40.91	310.83	1167.5	641.5	968.12	2716.2
Seg. cultivos	0	0	3945.2	3045	0	3945.2	3045.5	0	3945.2

Fuente: Elaboración propia con base en las salidas de LINGO 20.0

En cuanto al patrón óptimo de cultivos, el modelo asignó una producción nula a los forrajes debido a su alto consumo de agua y baja utilidad en cuanto a beneficio-costo, para el caso de granos y cereales asignó producción con agua superficial si la disponibilidad es del 100%, conforme disminuye la disponibilidad a 75% y 50%, reduce la cantidad de hectáreas a sembrar o simplemente no recomienda sembrar algunos cultivos dependiendo de la cantidad de agua requerida y los ingresos que genera. Respecto a leguminosas y hortalizas, el modelo recomendó en todo momento su producción y la cantidad de hectáreas destinadas para su producción se mantuvo constante independientemente del nivel de disponibilidad y el origen del agua, aunque en su mayoría fue con agua de pozo.

A continuación, se presenta una tabla que plantea los ingresos que percibirían los agricultores de los módulos de Abasolo, Irapuato y Salamanca, si se redujera el suministro de agua en diferentes porcentajes en escenarios sin y con mercado de agua. De modo que se pueda evidenciar que una disminución en la cantidad de agua disponible afecta de manera negativa los ingresos de los productores, pero también que en un esquema de mercado se optimiza mejor el recurso y se obtienen mayores ingresos que en ausencia de estos.

Tabla 5. Ingresos netos por modulo en distintos escenarios de disponibilidad de agua (millones de \$MN.)

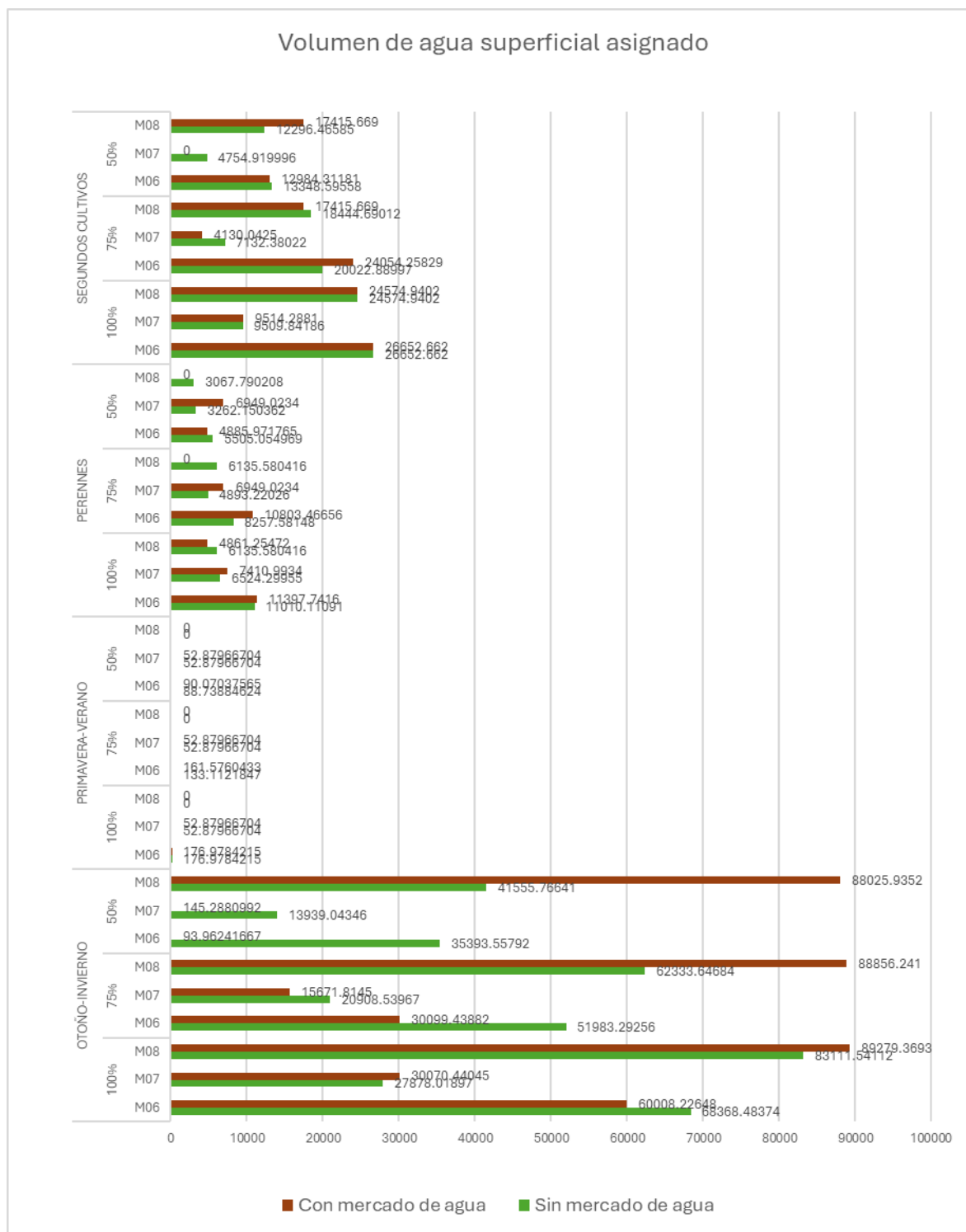
Ciclo	Disponibilidad de agua					
	Sin mercado de agua			Con mercado de agua		
	100%	75%	50%	100%	75%	50%
M06: SALAMANCA						
O-I	38.403	30.703	22.566	34.474	19.422	1.601469
P-V	.537416	.404211	.269466	.537416	.490645	.273509
Perennes	79.398	60.692	41.985	82.033	77.994	37.778
Seg. Cult.	128.669	103.649	77.921	128.669	118.863	75.795
M07: IRAPUATO						
O-I	19.792	17.626	13.916	20.474	15.593	.561535

P-V	.186449	.186449	.186449	.186449	.186449	.186449
Perennes	66.9958	50.247	33.498	73.228	71.357	71.357
Seg. Cult.	37.090	29.158	21.225	37.105	19.141	0
M08: ABASOLO						
O-I	170.772	146.513	112.876	177.531	177.479	176.509
Perennes	24.207	24.207	12.103	19.179	0	0
Seg. Cult.	141.060	120.410	82.569	141.060	116.943	116.943
TOTAL	707.111	583.794	419.116	714.477	617.469	481.005

Fuente: Elaboración propia con base en las salidas de LINGO 20.0

En la figura 2, se puede apreciar la distribución de aguas superficiales en los diferentes módulos y escenarios de escasez, con y sin mercado de agua. Es importante mencionar que, debido a que regularmente las aguas recargadas por los cuerpos de agua con las lluvias de verano son utilizadas en su mayoría para el ciclo otoño-invierno, mientras que para primavera-verano se utiliza mayor cantidad de agua de pozo, por lo que, su representatividad en la gráfica de agua superficial es casi nula.

Figura 5. Volumen de agua superficial utilizado por escenario (dam³)



Fuente: Elaboración propia con base en las salidas obtenidas de LINGO 20.0

4.6 DISCUSIÓN

La situación dada en esta investigación es muy similar a la presentada por Botello Aguillón et al. (2022), quien estimó un precio sombra de \$3.9/m³ contra los \$0.15/m³ pagados en los módulos de Cortazar y Salvatierra, o los \$1.44/m³ calculados por Martínez-luna et al. (2021) contra los \$0.02/m³ pagados en el distrito de riego 100 de Alfajayucan, Hidalgo. Incluso en la Comarca Lagunera el precio pagado fue muy inferior al estimado por Ramirez et al. (2019), cuyo valor fue de \$0.91/m³.

Como se puede observar, las tarifas de agua que pagan los agricultores tanto en los módulos 06, 07 y 08 del DR 011 como en las regiones de los estudios antes mencionados, son muy inferiores al valor económico del agua, lo que fomenta malas prácticas y manejo de agua inadecuado, derivando en un consumo excesivo y el desperdicio de esta.

4.7 CONCLUSIONES

Las tarifas que se pagan por el agua de riego en la región de estudio son considerablemente menores que la productividad marginal del agua estimada, lo que genera una asignación de agua ineficiente, pues en su mayoría se emplea para producir cultivos de bajo valor económico o de alto consumo de agua (avena forrajera, sorgo, etc), lo ideal sería incrementar los cultivos de ajo, esparrago, fresa, brócoli, coliflor, garbanzo, cebolla, zanahoria, entre muchas otras opciones de mayor rentabilidad y/o menor consumo de agua. Es recomendable que las tarifas sean definidas tomando como referencia el valor del producto marginal del agua, el cual debe ajustarse con base en los cambios periódicos del nivel de agua, lo que ayudaría a mejorar la administración de la demanda e incrementar la recuperación de costos por parte de los módulos y el distrito.

En la simulación de un mercado donde los usuarios de agua puedan comprar y vender derechos de uso del agua. Las subastas permiten asignar el agua a aquellos que están dispuestos a pagar el precio más alto por ella. Esto puede

proporcionar incentivos para un uso más eficiente y permitir que el agua se destine a su mejor uso económico. Es por ello que se observó un mayor ingreso neto por modulo en los diferentes niveles de disponibilidad de agua cuando hay mercado que cuando no existe. Sin embargo, la implementación de un mercado de agua puede ser compleja y requerir un marco regulatorio adecuado. También es importante considerar los posibles efectos negativos en la distribución intersectorial del ingreso si ciertos usuarios no pueden competir en igualdad de condiciones en el mercado.

Cabe mencionar que esta investigación presentó varias limitaciones con el uso de datos, como son, la no diferenciación de tecnologías de riego, el uso de costos agregados (mientras más específicos mejor) y el no utilizar datos de otros insumos pues no se encuentran disponibles o sencillamente no se lleva un registro en las bases de datos del DR 011 o la CONAGUA. Pese a ello, los resultados brindan una buena señal sobre el valor económico del agua en cada módulo y en diferentes escenarios de escasez. Por lo que, la presente investigación muestra la utilidad de la programación lineal con el uso de bases de datos limitadas, la cual podría replicarse tanto en otros módulos y distritos de riego, como en otras cuencas que presenten una gran presión sobre el recurso hídrico dentro y fuera de México.

4.8 CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

José Cortés: Conceptualización, Investigación, Metodología, Análisis formal y Redacción- borrador inicial. Dixia Vega: Conceptualización y Supervisión. Ramón Valdivia: Conceptualización y Metodología. César Botello: Metodología y Supervisión. Juan Hernández: Supervisión.

4.9 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al:

- (i) Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el financiamiento para el Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola del M.C. José Gilberto Cortés Ramírez.
- (ii) Sr. Agustín Robles Montenegro, presidente del Consejo de Administración de D.R. 011 Alto Río Lerma, Gto., S.R.L. de I.P. de C.V. y al Ing. Alfredo Marmolejo Cervantes, jefe de operación de la S.R.L. por el acceso a la información utilizada en la elaboración de las bases de datos para esta investigación.

4.10 LITERATURA CITADA

- 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>
- Bravo Pérez, H. M., Castro Ramírez, J. C., & Gutiérrez Andrade, M. Á. (2005). El banco de agua: una propuesta para salvar el lago de Chapala. *Gestión y Política Pública*, XIV(2), 289–309.
- Cao, Z., Zhu, T., & Cai, X. (2023). Hydro-agro-economic optimization for irrigated farming in an arid region: The Hetao Irrigation District, Inner Mongolia. *Agricultural Water Management*, 277(108095), 16. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.108095>
- Castro, J., Cruz, F., Magaña, J., Martínez, G., Reyes, A., & Sainz, R. (2017). La demanda del agua y su asignación eficiente en la agricultura: un caso en Guanajuato, México. *Economía Coyuntural*, 2(2), 145–180.
- CEAG. (2021). Mejores comités, mejores comunidades. Manual básico. In *Comisión Estatal del Agua de Guanajuato* (6th ed.). https://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/manuales/Manual_Basico.pdf
- Chambers, R. G. (1988). Applied production analysis : a dual approach. In *Cambridge University Press*.

- Chong, H., & Sunding, D. (2006). Water markets and trading. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, 239–264.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.020105.100323>
- CONAGUA. (2021). Estadísticas del Agua en México 2021. In *Comisión Nacional del Agua*. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2021.pdf
- CONAGUA, Gobierno del Estado de Guanajuato, & COLMERN, A. C. (2015). Programa Estatal Hidráulico de Guanajuato. Resumen ejecutivo. In CONAGUA. <https://agua.guanajuato.gob.mx/pdf/resumenejecutivo.pdf>
- 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 (Switzerland)*, 7(9), 11.
<https://doi.org/10.3390/agriculture7090073>
- Dai, Z. Y., & Li, Y. P. (2013). A multistage irrigation water allocation model for agricultural land-use planning under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 129, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.013>
- Exebio-García, A., Palacios-Vélez, E., Mejía-Saen, E., & Ruiz-Carmona, V. (2005). Metodología para estimar pérdidas por infiltración en canales de tierra. *Terra Latinoamericana*, 23(2), 213–223.
- FAO. (2013). Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. In *Informe Sobre Temas Hídricos no. 38*. <http://www.fao.org/3/a-i3015s.pdf>
- Fernández-Durán, J. J., & Lloret, A. (2016). Consumo de agua y producto interno bruto en la cuenca Lerma-Chapala. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(4), 129–138.
- Foster, S., Garduño, H., & Kemper, K. (2005). México – Los ‘ Cotas ’: Avances en la Gestión Participativa del Agua Subterránea en Guanajuato. In *Gestión Sustentable del Agua Subterránea. GWMate. Banco Mundial*. (Issue Caso 10).
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/784481468278736418/pdf/388100SPANISH01WMATE1CP11001PUBLIC1.pdf>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*

(Núm. 5).

<http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/view/83/82/251-1>

- Griffin, R. C. (2006). Water Resource Economics. The Analysis of Scarcity, Policies, and Projects. In *The MIT Press*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2479-2>
- Guzmán-Soria, E., Hernández-Martínez, J., García-Salazar, J. A., Rebollar-Rebollar, S., de la Garza-Carranza, M. T., & Hernández-Soto, D. (2009). Consumo de agua subterránea en guanajuato, México. *Agrociencia*, 43(7), 749–761.
- Harou, J. J., Pulido-Velazquez, M., Rosenberg, D. E., Medellín-Azuara, 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>
- Kaiser, H. M., & Messer, K. D. (2011). Mathematical Programming for Agricultural, Environmental, and Resource Economics. In *John Wiley & Sons, Inc.* (Vol. 4).
- Kung, C. C., & Wu, T. (2021). Influence of water allocation on bioenergy production under climate change: A stochastic mathematical programming approach. *Energy*, 231, 120955. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120955>
- Li, M., Fu, Q., Singh, V. P., & Liu, D. (2018). An interval multi-objective programming model for irrigation water allocation under uncertainty. *Agricultural Water Management*, 196, 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.016>
- 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, 1–12. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i=.544>
- McLarty, D., Panossian, N., Jabbari, F., & Traverso, A. (2019). Dynamic economic dispatch using complementary quadratic programming. *Energy*, 166, 755–764. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.087>
- Medellín-Azuara, 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.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>
- Mejía-Saenz, E., Palacios-Vélez, E., Chávez-Morales, J., Zazueta-Ranahan, F., Tijerina-Chávez, L., & Casas-Díaz, E. (2003). EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO DE TRANSFERENCIA DEL DISTRITO DE RIEGO 011 ALTO RÍO LERMA , GUANAJUATO , MÉXICO. *Terra Latinoamericana*, 21(4), 523–531. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321408>
- Mussafi, N. S. M., & Ismail, Z. (2021). Optimum risk-adjusted islamic stock portfolio using the quadratic programming model: an empirical study in Indonesia. *The Journal of Asian Finance, Economics ...*, 8(5), 839–850.
<https://doi.org/10.13106/jafeb.2021.vol8.no5.0839>
- Okoro, E. E., Otuekpo, J. E., Ekeinde, E. B., & Dosunmu, A. (2020). Rate and equilibrium based modeling with the sequential quadratic programming optimization method for glycol dehydration of produced natural gas. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(4), 745–756.
<https://doi.org/10.1007/s43153-020-00064-4>
- PNH. (2020). Programa Nacional Hídrico (PNH) 2020-2024. In *Gobierno de México*. <http://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024%0Ahttps://www.gob.mx/conagua/documentos/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024%0Ahttp://files/301/programa-nacional-hidrico-pnh-2020-2024.html>
- Quintana-Ashwell, N., Kaur, G., Singh, G., Gholson, D., Delhom, C., Krutz, L. J., & Hegde, S. (2021). Positive mathematical programming to model regional or basin-wide implications of producer adoption of practices emerging from plot-based research. *Agronomy*, 11(11).
<https://doi.org/10.3390/agronomy11112204>
- Ramirez, B. A., González, 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.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1295>
- Reyes Martínez, A., Castro Ramírez, J. C., & Martínez Atilano, G. (2019).

- Transferencia y conservación de la infraestructura hidroagrícola en el Alto Río Lerma, Guanajuato. *Entreciencias: Diálogos En La Sociedad Del Conocimiento*, 7(20), 65–76.
<https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2019.20.69247>
- 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 (Switzerland)*, 11(4), 1–23.
<https://doi.org/10.3390/w11040858>
- Rubiños-Panta, E., Palacios-Vélez, E., Martínez-Damián, M. Á., Valdivia-Alcalá, R., & Hernández-Acosta, E. (2004). Characterization of the Water Rights Market in Irrigation Districts. *Terra Latinoamericana*, 22(2), 217–224.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57322210>
- Sánchez, D. E., & Ramirez, N. L. (2017). Diseño de un modelo de programación lineal para la planeación de producción en un cultivo de fresa, según factores costo/beneficio y capacidades productivas en un periodo temporal definido. *Ingenierías USBMed*, 8(1), 7–11. <https://doi.org/10.21500/20275846.2564>
- Sheffield, J., Wood, E. F., Pan, M., Beck, H., Coccia, G., Serrat-Capdevila, A., & Verbist, K. (2018). Satellite Remote Sensing for Water Resources Management: Potential for Supporting Sustainable Development in Data-Poor Regions. *Water Resources Research*, 54(12), 9724–9758.
<https://doi.org/10.1029/2017WR022437>
- van Dooren, C. (2018). A Review of the Use of Linear Programming to Optimize Diets, Nutritiously, Economically and Environmentally. *Frontiers in Nutrition*, 5(48). <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00048>
- Wong, C. Y., Foo, D. C. Y., & Sin, L. T. (2020). Design and Optimisation of Water Recovery System for a Polylactide Production Process. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4(2), 149–161.
<https://doi.org/10.1007/s41660-020-00118-7>
- Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). Determining the Economic Value of Water. In *Resources for the Future (RFF) PRESS* (Second).

V. CONCLUSIONES GENERALES

Este estudio permitió identificar variaciones significativas en las tarifas necesarias para producir una tonelada de cebada, maíz grano y trigo grano en los diferentes módulos del Distrito de Riego 011. Se encontró que la tarifa calculada para el maíz grano es consistentemente superior a la de los otros cultivos, especialmente en módulos que requieren sistemas de bombeo. La aplicación de una tarifa uniforme por hectárea regada incentiva la producción de cultivos de alto consumo de agua y bajo valor económico, lo que sugiere que el ajuste de tarifas podría alentar una transición hacia cultivos de mayor rentabilidad y eficiencia hídrica.

Por otro lado, el problema del agua se está volviendo cada vez más urgente. En este contexto, sería esencial desarrollar políticas o programas destinados a apoyar a aquellos productores que, debido a sus limitados recursos económicos, no podrían cubrir cuotas de agua más elevadas. Estas medidas serían clave para garantizar una transición equitativa hacia una gestión hídrica más sostenible.

Además, se observó que las tarifas actuales de riego son significativamente menores que la productividad marginal estimada del agua, lo que contribuye a una asignación ineficiente del recurso. El estudio sugiere que una tarifa basada en el valor del producto marginal del agua, ajustada periódicamente de acuerdo con el nivel de disponibilidad hídrica, podría optimizar la administración de la demanda y mejorar la recuperación de costos en el distrito de riego. Este enfoque también facilitaría la transición hacia cultivos de mayor valor económico y menor consumo de agua, tales como el ajo, espárrago, y otros vegetales de alta rentabilidad.

La simulación de un mercado de agua demostró que el libre intercambio de derechos de uso hídrico entre usuarios podría maximizar los ingresos de cada módulo en diversos niveles de disponibilidad de agua. Las subastas, al permitir

que el agua se asigne a quienes estén dispuestos a pagar más, incentivan un uso más eficiente del recurso y su asignación hacia los usos económicos de mayor valor. Sin embargo, la implementación de un mercado de agua requeriría un marco regulatorio sólido para garantizar que todos los usuarios puedan participar en condiciones equitativas, y para mitigar posibles efectos negativos en la distribución del ingreso intersectorial.

A pesar de ciertas limitaciones de datos, como la falta de diferenciación en las tecnologías de riego y la ausencia de registros específicos de otros insumos, los resultados del estudio ofrecen una valiosa perspectiva sobre el valor económico del agua en los diferentes módulos y escenarios de escasez. Esta investigación evidencia la utilidad de la programación lineal como herramienta para mejorar la asignación de recursos hídricos, aun con bases de datos limitadas, y sugiere que este enfoque puede ser replicable en otros distritos de riego o cuencas con alta presión sobre el recurso hídrico, tanto en México como en otras regiones.