



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

TARIFAS EFICIENTES PARA EL CONSUMO DE AGUA EN LA AGRICULTURA DE LA COMARCA LAGUNERA, 2015-2016

TESIS

que como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN ECONOMÍA AGRÍCOLA

Presenta:



DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES

BRENDA ARACELY RAMÍREZ BARRAZA

Bajo la supervisión de:

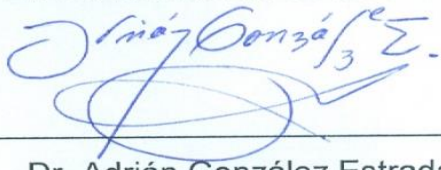
DR. ADRIÁN GONZÁLEZ ESTRADA

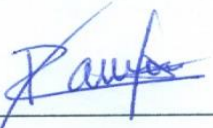
Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018

**TARIFAS EFICIENTES PARA EL CONSUMO DE AGUA EN LA
AGRICULTURA DE LA COMARCA LAGUNERA, 2015-2016**

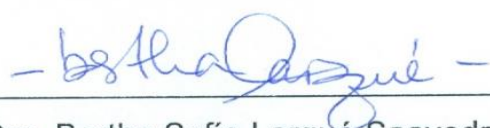
Tesis realizada por **Brenda Aracely Ramírez Barraza** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA


DIRECTOR: _____
Dr. Adrián González Estrada


ASESOR: _____
Dr. Ramón Valdivia Alcalá


ASESOR: _____
Dr. José María Salas González


LECTOR EXTERNO: _____
Dra. Bertha Sofía Larqué Saavedra

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFIA	5
2.1 El problema del agua en el mundo y en México.	5
2.2 Disponibilidad de agua en el mundo.....	6
2.2.1 Oferta del agua.....	6
2.2.1 Demanda por agua.....	10
2.2.2 Grado de presión hídrica	12
2.3 Disponibilidad del agua en México	13
2.3.1 Oferta del agua.....	14
2.3.2 Demanda por agua.....	18
2.3.3 Grado de presión hídrica	20
2.4 Disponibilidad del agua en la Comarca Lagunera	21
2.4.1 Oferta del agua.....	23
2.4.2 Demanda por agua.....	25
2.4.3 Grado de presión hídrica	25
3. MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 Teorías del valor y del precio.....	28
3.1.1 Teoría del valor de Adam Smith	28
3.1.2 Teoría del valor de David Ricardo	30
3.1.3 Teoría marxista del valor.	31
3.1.4 Teoría neoclásica de la escasez	33
3.2 Teoría del mercado del agua	37
3.2.1 Mercado	37
3.2.2 Eficiencia económica.....	42
3.3 Importancia del agua en la agricultura.	46
3.3.1 Importancia del agua en la producción agrícola	46
3.3.2 El agua y la seguridad alimentaria.....	47

3.4	Precio económico del agua en la agricultura	52
3.4.1	Producto marginal del agua.....	56
3.4.2	Producto promedio del agua.....	58
3.5	Técnicas de estimación del precio económico del agua	58
3.5.1	Enfoque indirecto.....	59
3.5.2	Enfoque directo.	69
4.	MÉTODOLOGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN	72
4.1	Programación lineal.	72
4.2	Modelos de programación lineal.	77
4.2.1	Componentes del modelo general de programación lineal.....	78
4.2.2	Formas de expresar el modelo de programación lineal.....	80
4.2.3	Teoría de la dualidad.	83
4.3	Fuentes de información.	86
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
6.	ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	94
6.1	Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera	94
6.2	Productividad y eficiencia del uso de agua de riego por gravedad en la Comarca Lagunera.....	118
7.	APÉNDICES.....	131
7.1	Apéndice 1. Ganancia de los cultivos de la modalidad riego por bombeo, 2015-2016	131
7.2	Apéndice 2. Ganancia de los cultivos de la modalidad riego por gravedad, 2015-2016.	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capacidad de almacenamiento per capita (m^3/hab).	9
Figura 2. Área de localización del DR-017, Comarca Lagunera, México	22
Figura 3. Curva de oferta y demanda	38
Figura 4. Usos del agua doméstica y elasticidades-precio de la demanda.....	40
Figura 5. Excedente del consumidor.....	42
Figura 6. Caja de Edgeworth.	43
Figura 7. Asignación eficiente en el sentido de Pareto	44

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1 Principales ríos del mundo,2016.	7
Cuadro 2. Principales lagos del mundo, 2016.	8
Cuadro 3. Países con mayor extracción de agua	11
Cuadro 4. Grado de presión del agua en el mundo	13
Cuadro 5. Principales ríos de México	15
Cuadro 6. Principales lagos de México.....	16
Cuadro 7. Principales presas en México.....	17
Cuadro 8. Uso agrupado del agua en México, 2016.....	20
Cuadro 9. Grado de presión del agua, 2016.....	21
Cuadro 10. Capacidad de almacenamiento de las principales presas de la Región Lagunera.....	24
Cuadro 11 Condición de los acuíferos de la Región Lagunera.....	27
Cuadro 12. Elementos de un modelo de programación lineal.	79
Cuadro 13. Relación entre los problemas dual y primal.....	85

ABREVIATURAS USADAS

Abreviatura/ Símbolo	Definición
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DR-017	Distrito de Riego 017. Distrito de Riego Región Lagunera
Hm ³	El hectómetro cúbico es una unidad de volumen. Se corresponde con el volumen de un cubo de cien metros de lado. Un hm ³ = 1,000,000 m ³
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
NAME	Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias, es el nivel más alto que debe alcanzar el agua en el vaso bajo cualquier condición. Aplicado a ríos el NAME es el nivel de riesgo para el cual se tiene protección con obras de infraestructura hidráulica
NAMO	Nivel de Aguas Máximas Ordinarias. Es el máximo nivel con que se puede operar la presa para satisfacer las demandas; cuando el vertedor de excedencias no es controlado por compuertas, el NAMO coincide con su cresta o punto más alto del vertedor.
RHA	Región Hidrológica Administrativa
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación

DEDICATORIAS

A mi familia, que me ha apoyado en los momentos difíciles y me ha dado fuerza para seguir adelante.

A mi padre Isaac Ramírez López y a mi madre Elisa Barraza Celis (Q.E.P.D.).

A mis hermanos Isaac y Vanessa.

A mi esposo Enrique Ávila, por su apoyo y comprensión en cada decisión que tomo para seguir adelante en la vida.

A mi hijo Enrique.

A mis amigos por su amistad incondicional y sus consejos oportunos en los momentos difíciles

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico para llevar a cabo las actividades académicas durante mi posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo, en especial al Programa de posgrado de la División de Ciencias Económico Administrativas, por el apoyo y oportunidad para continuar mis estudios de doctorado en el área de la Economía.

A mi director de tesis el Dr. Adrián González Estrada por su paciencia y dedicación y por su valiosa colaboración en el presente trabajo de investigación.

A mis asesores de tesis: Dr. Ramón Valdivia Alcalá, Dr. José María Salas González y a la Dra. Bertha Sofía Larqué Saavedra, por sus aportes y sugerencias para mejorar la presente investigación.

Al Dr. José Alberto García Salazar por su aportación y consejos que contribuyeron al desarrollo de la presente investigación.

A los profesores de la DICEA, por los conocimientos académicos que me transmitieron, los cuales fueron importantes para el desarrollo de este trabajo de investigación.

DATOS BIOGRÁFICOS

Datos personales

Nombre: Brenda Aracely Ramírez Barraza

Fecha de nacimiento: 16 de abril de 1988

Lugar de nacimiento: Los Mochis, municipio de Ahome, Sinaloa

CURP: RABB880416MSLMRR00



Desarrollo Académico

Diplomado: Diplomado en Econometría Aplicada. Escuela Superior de Economía-Instituto Politécnico Nacional. 2017.

Maestría: Maestría en Ciencias en Economía. Colegio de Postgraduados. 2012-2013. Cédula profesional: 08812271

Licenciatura: Licenciatura en Economía Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. 2006-2010. Cédula profesional: 703075

RESUMEN GENERAL

TARIFAS EFICIENTES PARA EL CONSUMO DE AGUA EN LA AGRICULTURA DE LA COMARCA LAGUNERA, 2015-2016.

La Comarca Lagunera es una región con escasa precipitación y sequías recurrentes, en la que el sector agrícola es el mayor consumidor de agua. La poca disponibilidad del recurso y la competencia entre los distintos sectores hace necesaria una asignación eficiente del mismo. Los objetivos de esta investigación fueron determinar el precio sombra del agua de riego de gravedad y de bombeo en la Región Lagunera y calcular las tarifas eficientes que induzcan un uso óptimo del recurso. Se usó un modelo de programación lineal con restricciones de disponibilidad de fuerza de trabajo, tierra y agua. Además, se especificó y estimó una función de producción que relaciona la ganancia con el volumen de agua empleado en los principales cultivos de la Comarca Lagunera.

Los resultados del modelo de programación lineal indican que el precio sombra del agua es \$1.558/m³ para bombeo y \$0.906/m³ para gravedad. Los de la función de producción muestran que la productividad marginal del agua es \$0.414m³, que equivale a \$7,719 por hectárea. Por otra parte, la cuota de riego que pagan los productores agrícolas de la Región Lagunera de \$1,600 por hectárea.

Se concluyó que las cuotas que se pagan por el agua de riego en la región son considerablemente menores que el costo de oportunidad o precio sombra del agua. Se recomienda que las tarifas sean definidas con base en el precio sombra del agua, el cual se debe ajustar de acuerdo con los cambios en el nivel de escasez del agua.

Palabras clave: tarifas eficientes, costo de oportunidad del agua, valor marginal del agua, patrón óptimo de cultivos

Tesis de Doctorado en Ciencias en Economía Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: Brenda Aracely Ramírez Barraza
Director de Tesis: Dr. Adrián González Estrada

GENERAL ABSTRACT

EFFICIENT TARIFFS FOR WATER CONSUMPTION IN COMARCA LAGUNERA'S AGRICULTURE, 2015-2016

The Comarca Lagunera is a region with a scarce precipitation and frequent droughts, where the agricultural sector is the largest consumer of water. The low availability of water and the strong competition for water among diverse sectors makes necessary to define an efficient allocation and use of that resource. The objectives of this research were to determine the shadow price of water in pumping and gravity irrigation in the Lagunera Region and calculate the efficient fees that lead the agriculture to an optimal use of water. It was used a linear programming model with restrictions on the availability of labor, land and water. In addition, a production function which relates profits with the volume of water used in main crops was specified and estimated.

The results of the linear programming model indicate that the shadow price of water is \$1.558/m³ for pumping irrigation and \$0.906/m³ for gravity irrigation. The results of the productivity function show that water marginal productivity is \$0.414m³, which is equivalent to 7,719 pesos per hectare. On the other hand, the irrigation fee paid by agricultural producers was \$1,600 per hectare.

It was concluded that fees paid for water in regional agriculture are considerably lower than the opportunity cost or shadow price of water. It is recommended that the fee for water use should be determined by the shadow price of water, which will vary in accordance with changes in the level of water scarcity.

Key words: efficient fees, water opportunity cost, marginal value of water, optimal crop pattern.

Thesis Doctorate of Science in Agricultural Economics. Chapingo Autonomous University
Author: Brenda Aracely Ramírez Barraza
Advisor: Dr. Adrián González Estrada

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La agricultura de riego consume el 70% de las extracciones de agua a nivel mundial, el sector industrial —incluida la producción de energía— el 20% y usos domésticos el 10%. La producción de alimentos, principalmente la agricultura de riego, utilizan la mayor parte del agua dulce extraída del subsuelo (HLPE, 2015).

El uso irrestricto de agua ha crecido a nivel global a un ritmo mayor que el doble de la tasa de crecimiento de la población durante el siglo XX. La presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre ese recurso renovable pero finito, sobre todo, en regiones áridas y semiáridas. Bajo la presión conjunta del crecimiento de la población y del consumo de alimentos, la demanda por agua está aumentando en todas las regiones del mundo (FAO, 2013).

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión sobre el agua de 19.2%, lo cual se considera bajo. Sin embargo, existe una gran diversidad a nivel regional. El menor grado de presión hídrica se presenta en la región hidrológico-administrativa XI, Frontera Sur, con 1.7%, mientras que la región con más alto grado de presión se encuentra en la zona Centro, en la región hidrológico-administrativa XIII, Aguas del Valle de México, con 138.7% (CONAGUA, 2016, 94). Además, la zona Norte de México presenta presión alta, debido a la gran escasez de agua, con la cual se tiene que cubrir cuantiosa demanda por la misma.

El grado de presión del recurso agudiza el nivel de escasez de agua, lo que ocasiona conflictos entre los sectores demandantes (agrícola, pecuario, industrial y urbano) del recurso.

La Comarca Lagunera es una región de México que se caracteriza por ser una zona árida, con clima muy seco y escasa precipitación, por lo que presenta problemas de sequías recurrentes. Se encuentra en el Distrito de Riego 017 en las Cuencas Centrales del Norte, específicamente, en la Región Hidrológica 36,

que se conforma por las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval (Macías *et al*, 2007).

La demanda anual de agua potable para los asentamientos humanos de los 15 municipios que conforman la Comarca Lagunera, es de 127 millones de metros cúbicos, los cuales se obtienen, en su mayor parte, del subsuelo. Actualmente, la situación es crítica, debido a que se tienen que perforar 300 metros o más para obtener 30 litros de agua por segundo, y muchas veces sale contaminada con arsénico, cuando antes se perforaban 30 metros para obtener 300 litros de agua (El Siglo de Torreón, 2010).

La principal actividad económica de la región es la agropecuaria y tiene cerca de 38 mil productores, tanto del sector privado como del ejidal (Vargas, 2017). Ocupa el primer lugar a nivel nacional en la producción de melón, sorgo forrajero, sorgo escobero, leche de bovino y carne de ave; el segundo lugar en producción de maíz forrajero; el tercero en producción de algodón y huevo; el cuarto en la producción de nogal y alfalfa y el quinto en producción de carne de caprino. De cada 10 litros que se producen de leche en México, dos corresponden a La Laguna, por lo que se considera como la principal cuenca lechera. También destaca por su potencial de exportación de algodón, carne de ave, carne de bovino, tomate, melón, higo, sandía y nuez, productos agropecuarios que ya incursionan algunos de ellos en el mercado internacional. La Comarca Lagunera juega un papel preponderante en el sector agropecuario, dada la ubicación geográfica, la vocación agrícola y social que ha tendido la región. Los productores agropecuarios son atendidos por la SAGARPA mediante tres subdelegaciones, dos distritos de Desarrollo Rural y 16 Centros de Apoyo al Desarrollo Rural (González, 2016).

La relativamente baja disponibilidad de agua y la competencia entre los distintos sectores hace necesaria una eficiente administración de la misma. Además, es importante una gestión racional para conseguir un aprovechamiento eficiente y equitativo que favorezca la conservación y protección de los recursos hídricos (ICWE, 1992), en especial, en el sector agrícola de las regiones áridas y

semiáridas, donde el incremento de la extracción de agua aumenta convive con una extrema competencia por los recursos hídricos. Más aun, se prevé que el cambio climático agravará la escasez de agua y aumentará la recurrencia e intensidad de las sequías en esas regiones (Kahil *et al*, 2015). En consecuencia, es de gran importancia identificar y evaluar opciones de adaptación de la agricultura al cambio climático, a corto y mediano plazos (Ojeda *et al*, 2012).

Debido a que la disponibilidad del agua y sus usos están directamente determinados por el desarrollo económico y social, es de vital importancia adoptar medidas para el uso adecuado y eficiente de los recursos hídricos e inducir un manejo integral y sostenible.

La identificación de prioridades e intercambios relativos a la distribución del agua, requieren una cuidadosa y oportuna atención con miras a enfrentar una gama creciente de complicaciones tales como: sustentabilidad de los recursos hídricos, justicia, contaminación, medio ambiente, servicios básicos, desarrollo, competencia y globalización. Las políticas nacionales enfocadas al sector hídrico deben considerar estos temas, ya que, de otra manera, la tendencia a subvaluar y sobreexplotar los recursos hídricos provocará un impacto creciente y negativo sobre la economía global y la sociedad (Asad & Dinar, 2006).

No obstante que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, existen pocos estudios que estiman la función de demanda por agua para uso agrícola, su respuesta ante variaciones en los precios y las tarifas que se deben cobrar para inducir un uso eficiente del agua.

En el caso del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera se cobra una cuota promedio de riego de 1,600 pesos por hectárea sin considerar el tipo de cultivo. Esta cuota alcanza a cubrir parcialmente los costos de operación, pero no incluye los costos de mantenimiento de los canales ni de las obras principales, así como la pérdida de agua en el proceso de conducción y distribución. Se trata claramente de una tarifa que produce ineficiencias considerables y grandes pérdidas económicas y de bienestar para la sociedad.

Con el fin de afrontar esos problemas y retos, los objetivos de esta investigación fueron: a) estimar el precio sombra o económico del agua de riego de gravedad en la Región Lagunera y b) proponer alternativas de uso del agua que sean eficientes, sostenibles y promotoras del bienestar.

La hipótesis que guio esta investigación establece que las cuotas del agua de riego que pagan los productores son menores que el precio del agua, lo cual es fuente de graves ineficiencias y de pérdidas considerables de posibilidades para mejorar el bienestar social.

El precio sombra suele usarse (Palacios & Excebio, 1989), para hacer una mejor asignación del agua a las actividades que producen el mayor beneficio económico y social (Ward & Michelsen, 2002). La definición del precio eficiente del agua es crucial para mejorar su asignación, fomentar su conservación y mejorar la eficiencia de su uso, tanto a nivel individual como social (Dinar & Subramanian, 1997). Además, el precio sombra ayuda a mejorar la administración de la demanda y a incrementar la recuperación de costos

La presente tesis está estructurada en seis capítulos que desarrollan el contenido de la investigación. El capítulo uno está conformado por la introducción general, en donde se describe la importancia del problema investigado, antecedentes, justificación, hipótesis y objetivos del estudio. En el capítulo dos se muestra el marco referencial y se describe la situación de la disponibilidad de agua a nivel mundial, en México y en la Región Lagunera. En el capítulo tres se presenta el marco teórico. El capítulo cuatro aborda la metodología y las fuentes de información empleadas para realizar la investigación. En el capítulo cinco se enlistan las referencias bibliográficas. En el capítulo seis se exponen los artículos científicos enviados a revistas indexadas de CONACYT, y en el capítulo siete se presentan los apéndices.

2. REVISIÓN DE BIBLIOGRAFIA

2.1 El problema del agua en el mundo y en México.

El agua es la sustancia que más abunda en la Tierra y es la única que se encuentra en la atmósfera en estado líquido, sólido y gaseoso. La mayor reserva de agua está en los océanos, que contienen el 97% del agua que existe en la Tierra. Se trata de agua salada, que sólo permite la vida de la flora y fauna marina. El resto es agua dulce, pero no toda está disponible: gran parte permanece siempre helada, formando los casquetes polares y los glaciales (FAO, 1996).

El agua es indispensable para la vida, ningún organismo sobrevive sin ella. Es un constituyente esencial de la materia viva y la fuente de hidrógeno para los organismos. Influye en ellos a través de la atmósfera y el clima. Es el medio en el que se desarrolla la abundante y variada flora y fauna acuática.

Los usos más importantes están relacionados con la agricultura y el consumo industrial y doméstico. Su demanda se ha incrementado notablemente con el crecimiento de la población. En las últimas décadas, se han multiplicado las áreas agrícolas dependientes del riego para la producción de alimentos. Las industrias y actividades mineras la emplean para el lavado, enfriamiento, dilución, remojo, procesamiento, eliminación de productos de desecho, etc. Es posible utilizar las caídas de agua para producir electricidad y para mover molinos. Los ríos son un importante medio de transporte y comunicación (*ibíd.*).

2.2 Disponibilidad de agua en el mundo

2.2.1 Oferta del agua

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 billones de hm^3 , de los cuales el 97.5% es agua salada y solo 35 billones de hm^3 , es decir un 2.5% es agua dulce, de esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en glaciares, nieve y hielo

Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta el acceso a este recurso. Se estima que únicamente el 0.77% del agua dulce es accesible para el ser humano (CONAGUA, 2017a).

La precipitación pluvial constituye una parte importante del ciclo hidrológico, ya que produce el agua renovable del planeta. Sin embargo, la precipitación pluvial varía regional y estacionalmente (*ibíd.*).

Agua superficial.

Ríos

Los ríos son un claro ejemplo de aguas superficiales. Se definen como la corriente natural de agua que fluye por un lecho, desde un lugar elevado a otro más bajo. La gran mayoría de los ríos desaguan en el mar o en un lago, aunque algunos desaparecen, debido a que sus aguas se filtran en la tierra o se evaporan en la atmósfera. Los ríos constituyen una importante fuente de suministro de agua para usos agrícolas y domésticos (Enciclopedia Medioambiental, 2016).

Entre los ríos de mayor longitud del mundo destacan el Nilo, con una longitud de 6.680 kilómetros, y el Amazonas, con 6.500 kilómetros de longitud (Cuadro 1).

Cuadro 1 Principales ríos del mundo,2016.

Número de orden	Nombre	Región	Longitud	Caudal en la desembocadura
1	Nilo	África	6.680 km con un afluente del lago Victoria 5.600 km desde el lago	máx: 8.600m ³ /s (en Asuán) min:866m ³ /s
2	Amazona	América del sur	6.500 km	máx: 150.000 m ³ /s mín: 63.000 m ³ /s
3	Mission Mississippi	América del norte	6.260 km	máx: 40.000 m ³ /s mín: 18.000 m ³ /s
4	Yang Tse Kiang	China	5.500 km	máx: 42.000 m ³ /s
5	Hoang Ho	China	5.200 km	máx: 14.000 m ³ /s
6	Congo	África	4.640 km	máx: 80.000 m ³ /s
7	Amur	Extremo Oriente	4.350 km	
8	Lien	Siberia	4.270 km	media: 15.500 m ³ /s
9	Niger	África	4.200 km	máx: 30.000 m ³ /s
10	Mekong	Asia del sudeste	4.180 km	máx: 60.000 m ³ /s
11	Mackenzie	América del norte	4.100 km	
12	Obi	Siberia	4.000 km	media: 12.500 m ³ /s
13	Yenisei	Siberia	3.800 km	media: 10.000 m ³ /s
14	Voiga	Europa Oriental	3.700 km	media: 51.800 m ³ /s

Fuente: Enciclopedia Medioambiental (2016).

Lagos

Otro ejemplo de aguas superficiales son los lagos; es decir, depósitos de agua dulce o salada embalsada en tierra firme. Entre los lagos más grandes de la Tierra destacan el Lago Superior, situado en América del Norte con una superficie de 82.700 km², y el Lago Victoria en África Oriental, con 68.100 km² (Cuadro 2).

Cuadro 2. Principales lagos del mundo, 2016.

Nombre	Región	Superficie (km ²)
Superior	América del Norte	82.7
Victoria	África Oriental	68.1
Mar de Aral	Asia Central	67
Hurón	América del Norte	59.8
Michigan	América del Norte	58.3
Tanganyika	África Oriental	31.9
Baikal	Siberia	31.5
Gran Lago de los Osos	América del Norte	31.1
Nyasa	África Oriental	30.8
Chad	África Central	28.0
Gran Lago del Esclavo	América del Norte	27.8
Ene	América del Norte	25.8
Winnipeg	América del Norte	24.3
Ontario	América del Norte	18.8
Ladoga	Europa del Noreste	18.4
Baljash	Asia Central	17.3
Maracaibo	América del Sur	16.3
Onega	Europa del Noreste	9.6
Eyre	Australia	9.5
Rodolfo	África Oriental	8.6
Nicaragua	América central	8.4
Titicaca	América del Sur	8.3

Fuente: Enciclopedia Medioambiental (2016).

Presas de almacenamiento en el mundo.

El principal objetivo de una presa es regular el flujo del agua en los ríos. El agua almacenada puede tener uno o varios usos a la vez, como generación de energía eléctrica, proporcionar volúmenes de agua para riego y el abastecimiento público. La capacidad de almacenamiento de las presas del país es de aproximadamente 150 mil millones de m³. Son 180 presas las consideradas como principales y representan el 80% de la capacidad de almacenamiento nacional. La capacidad de almacenamiento de agua para su aprovechamiento en diversos usos y el control de avenidas para evitar inundaciones, es proporcional al grado de desarrollo hidráulico de los países (CONAGUA, 2017a).

La capacidad de almacenamiento *per capita* es un indicador que permite la

valoración de las presas. Cabe destacar que, México ocupa el lugar número 35 a nivel mundial (Figura 1).

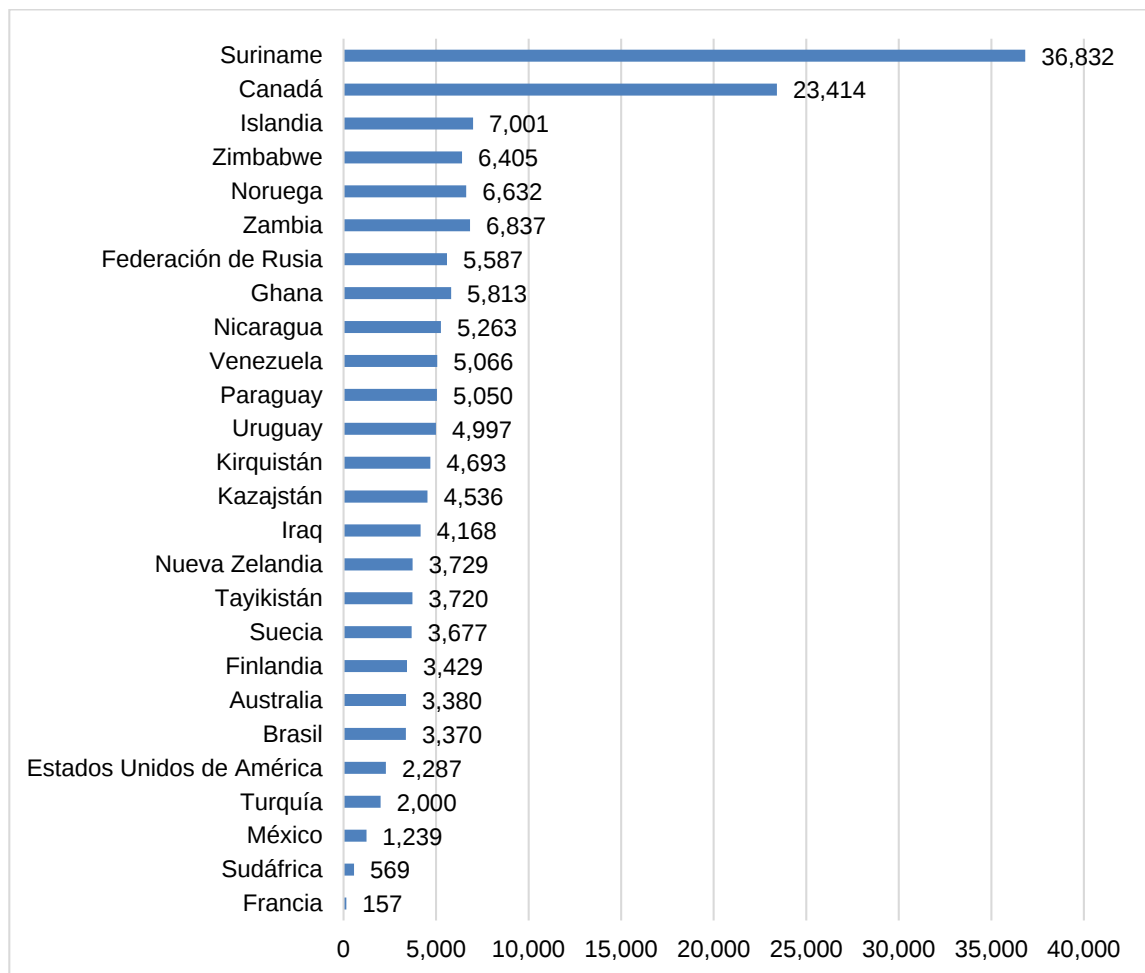


Figura 1. Capacidad de almacenamiento per capita (m³/hab).

Fuente: FAO (2016).

Agua subterránea.

Las aguas subterráneas abastecen de agua potable por lo menos al 50% de la población mundial y representan el 43% de toda el agua utilizada para el riego (FAO, 2010 citado en UNESCO & WWDR, 2015). A nivel mundial, 2,500 millones de personas dependen exclusivamente de los recursos de aguas subterráneas para satisfacer sus necesidades básicas diarias de agua (UNESCO & WWDR, 2015).

2.2.1 Demanda por agua

Usos del agua

Los usos del agua se dividen en industrial, agrícola y abastecimiento público.

Uso industrial.

La industria es uno de los principales motores de crecimiento y desarrollo económico. A nivel mundial alrededor del 19% del agua extraída se emplea en la industria (FAO 2011, citado en CONAGUA,2017a). De esta cantidad, más de la mitad se utiliza en las centrales termoeléctricas para sus procesos de enfriamiento. Entre los mayores consumidores del agua bajo este rubro, se encuentran las plantas petroleras, las industrias metálicas, papeleras, madereras, el procesamiento de alimentos y las manufactureras. Se estima que la demanda global de agua para la industria manufacturera se incrementará 400% del 2000 al 2050, centrada en economías emergentes (WWAP, 2015, citado en CONAGUA, 2017a). Los países que destinan más del 50% de sus extracciones de agua al sector industrial son: Francia, Turquía, Tailandia y Egipto (Cuadro 3).

Uso agrícola.

El riego es fundamental para la alimentación mundial. De la superficie cultivada, sólo el 19% tiene infraestructura de riego, sin embargo, produce más del 40% de los cultivos del mundo (FAO,2011 citado en CONAGUA, 2017a). En los últimos años la agricultura ha utilizado mayor cantidad de agroquímicos, que han derivado en la contaminación de suelos y acuíferos. La prospectiva es que para el 2050, la agricultura necesitará incrementar su producción 60% a nivel global, y 100% más en países en desarrollo, lo que difícilmente podrá lograrse con las tendencias actuales de crecimiento de uso e ineficiencia (WWAP,2015 citado en CONAGUA, 2017a). México ocupa el séptimo lugar a nivel mundial en superficie con infraestructura de riego, mientras que en los primeros lugares están India, China, y los Estados Unidos de América. Los países que más destinan agua para

la agricultura son: Sudán con 96.75, Pakistán con 94%, Uzbequistán con 93.2%, Indonesia con 91.3% y Tailandia y la India con 90.4% (Cuadro 3). En términos de volumen, la agricultura es el sector que consume más agua en el mundo.

Uso de abastecimiento público.

Los principales países que destinan el mayor porcentaje de extracción del agua al uso de abastecimiento público son: Sudáfrica con 31.2%, Brasil con 20.3%, Rusia con 20.2%, Canadá con 19.6%, e Italia con 18.2% (Cuadro 3).

Cuadro 3. Países con mayor extracción de agua

No.	País	Extracción total de agua (km ³ /año)	% Uso agrícola	% Uso industrial	% Uso abastecimiento público
1	India	761.0	90.4	2.23	7.4
2	China	554.1	64.6	23.21	12.2
3	Estados Unidos	478.4	40.2	46.11	13.7
4	Pakistán	183.5	94.0	0.76	5.3
5	Irán	93.3	92.2	1.18	6.6
6	Japón	88.4	62.5	17.87	19.7
7	Indonesia	82.8	91.3	0.68	8.0
8	México	80.6	76.7	9.2	14.1
9	Filipinas	78.9	83.1	24.14	7.4
10	Vietnam	71.4	68.1	5.86	7.8
11	Egipto	68.3	86.4	59.82	7.8
12	Rusia	66.2	19.9	14.7	20.2
13	Iraq	66.0	78.8	17.96	6.5
14	Brasil	59.3	61.8	2.06	20.3
15	Uzbequistán	58.3	93.2	4.85	4.7
16	Tailandia	57.3	90.4	68.68	4.8
17	Canadá	46	11.8	36.71	19.6
18	Italia	44.4	45.1	10.72	18.2
19	Turquía	40.1	73.8	74.47	15.5
20	Francia	40.0	9.8	82.12	15.7
21	Alemania	38.9	2.9	35.39	14.9
22	Ucrania	37.5	52.5	35.39	12.2
23	Sudán	37.3	96.7	0.7	2.7
42	Sudamérica	12.5	62.7	6.05	31.2

Fuente: CONAGUA (2011)

2.2.2 Grado de presión hídrica

El crecimiento demográfico, la urbanización, la industrialización y el aumento de la producción y el consumo han generado una demanda de agua dulce cada vez mayor.

El uso de agua sin restricciones ha crecido a nivel global a un ritmo de más del doble del aumento de la población en el siglo XX, hasta tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable. La presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre un recurso renovable pero finito, sobre todo en regiones áridas y semiáridas. La agricultura es el sector económico en el que la escasez de agua tiene más relevancia. En la actualidad, la agricultura es responsable del 70% de las extracciones de agua dulce y de más del 90% de su uso consuntivo. Bajo la presión conjunta del crecimiento de la población y de los cambios en la dieta, el consumo de alimentos está aumentando en casi todas las regiones del mundo. Se espera que para el año 2050 sea necesario producir 1 billón de toneladas de cereal y 200 millones de toneladas de carne más al año para poder satisfacer la creciente demanda de alimentos. (FAO, 2013)

Se estima que el 20% de los acuíferos mundiales están siendo sobreexplotados (Gleeson *et al.*, 2012 citado en UNESCO & WWDR, 2015), lo que va a tener graves consecuencias, como el hundimiento del suelo y la intrusión de agua salada (USGS, 2013 citado en UNESCO & WWDR, 2015).

El grado de presión se determina al dividir la extracción entre el agua renovable. Por su baja disponibilidad, los países del Medio Oriente sufren una presión más fuerte sobre los recursos hídricos. Kuwait, Emiratos Árabes Unidos, Arabia Saudita, Libia, Qatar y Bahrein presentan un grado de presión del recurso hídrico por arriba del 205% (Cuadro 4).

Cuadro 4. Grado de presión del agua en el mundo

No.	País	Agua renovable (km ³)	Extracción total (km ³)	Grado de presión (%)	Clasificación del grado de presión
1	Kuwait	0.02	0.9	2075	Muy alto
2	Emiratos Arabes Unidos	0.15	4	1867	Muy alto
3	Arabia Saudita	2.4	23.7	943.3	Muy alto
4	Libia	0.7	5.8	822.9	Muy alto
5	Qatar	0.06	0.4	374.1	Muy alto
6	Bahrein	0.12	0.4	205.8	Muy alto
7	Yemen	2.1	3.6	168.6	Muy alto
8	Turkmenistán	24.77	28	112.5	Muy alto
9	Uzbekistán	48.87	56	100.6	Muy alto
10	Egipto	58.3	78.0	126.6	Muy alto
11	Jordania	0.94	0.9	92.4	Alto
12	Barbados	0.08	0.1	87.5	Alto
13	Omán	1.4	1.3	84.7	Alto
14	República Árabe Siria	16.8	16.8	84.2	Alto
15	Israel	1.78	2.0	79.7	Alto
16	Pakistán	246.8	183.5	74.4	Alto
17	Iraq	89.86	66	73.4	Alto
18	Sudán	37.8	26.9	71.2	Alto
19	Túnez	4.62	3.31	69.7	Alto
20	Irán	137	93.3	67.9	Alto
42	Sudáfrica	51.35	15.5	30.2	Medio
48	México	446.78	85.7	19.8	Bajo
49	Turquía	211.6	42	19.8	Bajo
	Estados Unidos de América	3069	485.6	13.6	Bajo
58	Francia	211	30.2	14.1	Bajo
147	Brasil	8647	74.8	0.9	Sin estrés

Fuente: CONAGUA (2016)

2.3 Disponibilidad del agua en México

México recibe aproximadamente 1,489,000 millones de m³ de agua en forma de precipitación al año. De esta agua, se estima que el 71.6% se evapora y regresa a la atmósfera, el 22.2% escurre por los ríos o arroyos, y el 6.2% 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 471.5 mil millones de m³ de agua dulce renovable (CONAGUA, 2014).

2.3.1 Oferta del agua.

La disponibilidad del agua en México es muy desigual, los estados del norte representan el 50% de la superficie y llueve solo el 25% del total nacional, mientras los estados del sur que ocupan el 27.5% del territorio, cae la mayor parte del agua de lluvia, 49.6%, esto es en los estados del sur-sureste (Chiapas, Oaxaca, Campeche, Quintana Roo, Yucatán, Veracruz y Tabasco).

Entre los estados más secos está Baja California: tan sólo llueve un promedio de 199 mm por año. En contraste está Tabasco, que recibe 2,588 mm de agua cada año. En México llueve cada vez menos. De 1994 a la fecha ha llovido menos del promedio histórico anterior.

Mientras que en la frontera sur la disponibilidad promedio es mayor a 155 km³, en la región del Río Bravo no llega a los 15 km³ y en Baja California es inferior a los 5 km³. (FCEA, 2016).

El agua disponible en México comprende el agua aprovechable en la superficie y el agua subterránea, es decir, el agua de ríos, presas, y el agua en los acuíferos.

Agua superficial y subterránea

Agua superficial.

Corresponde al agua que proviene de precipitaciones y se queda en la superficie de la tierra formando ríos o lagos.

Los ríos y arroyos de México componen una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud. Por los cauces de los 51 ríos principales fluye el 87% del escurrimiento superficial de México y sus cuencas cubren el 65% de la superficie territorial continental del país (Cuadro 5).

En cuanto a la superficie que abarcan, destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas, y por su longitud, los ríos Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma, Nazas y Aguanaval pertenecen a la vertiente interior. Dos tercios del escurrimiento superficial se dan en los cauces de siete ríos: Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá, a la vez que sus cuencas representan el 22% de la superficie del país (CONAGUA,2016).

Cuadro 5. Principales ríos de México

No.	Río	Escurrimiento natural medio superficial (millones de m ³ /año)	Área de la cuenca (km ²)	Longitud del río (km)	Vertiente
1	Balsas	16,279	117,406	770	Pacífico y Golfo de California
2	Santiago	7,423	76,416	562	Pacífico y Golfo de California
3	Verde	6,046	18,812	342	Pacífico y Golfo de California
4	Ometepec	5,100	6,922	115	Pacífico y Golfo de California
5	El Fuerte	5,024	33,590	540	Pacífico y Golfo de California
6	Papagayo	4,288	7,410	140	Pacífico y Golfo de California
7	San Pedro	3,347	26,480	255	Pacífico y Golfo de California
8	Yaqui	3,179	72,540	410	Pacífico y Golfo de California
9	Culiacán	3,122	15,731	875	Pacífico y Golfo de California
10	Suchiate	1,584	203	75	Pacífico y Golfo de California
34	Grijalva-Usumacinta	101,517	83,553	1521	Golfo de México y Mar Caribe
35	Papaloapan	42887	46,517	354	Golfo de México y Mar Caribe
36	Coatzacoalcos	28,679	17,369	325	Golfo de México y Mar Caribe
37	Panuco	19,673	84,956	510	Golfo de México y Mar Caribe
38	Tecolutla	6,098	7,903	375	Golfo de México y Mar Caribe
39	Bravo	5,588	225,242	ND	Golfo de México y Mar Caribe
40	Tonalá	3,955	5,679	82	Golfo de México y Mar Caribe
50	Lerma	4742	47116	708	Interior
51	Nazas-Aguanaval	2085	89239	1081	Interior
Total		310,889	1,251,293		

Fuente: CONAGUA (2016).

Lagos.

El lago de Chapala es el más grande de los lagos interiores de México, está ubicado entre Jalisco y Michoacán de Ocampo y tiene una extensión de 1,116 kilómetros cuadrados, cuenta con una profundidad promedio que oscila entre cuatro y seis metros. Los cuerpos de agua cumplen funciones hidrológicas para sus cuencas. Los cuerpos de agua pueden ser también creados por el hombre (en cuyo caso se denominan artificiales), como los embalses formados por las presas. El Cuadro 6 muestra las características de algunos lagos selectos.

Cuadro 6. Principales lagos de México.

No.	Lagos	Entidad federativa	Área de cuenca (km ²)	Capacidad de almacenamiento (millones de m ³)	Clave	RHA
1	Chapala	Jalisco y Michoacán de Ocampo	1,116	8,126	VIII	Jerma-Santiago-Pacífico
2	Cuitzeo	Michoacán de Ocampo	306	920	VIII	Jerma-Santiago-Pacífico
3	Pátzcuaro	Michoacán de Ocampo	97	550	VIII	Jerma-Santiago-Pacífico
4	Yuriria	Guanajuato	80	188	VIII	Jerma-Santiago-Pacífico
5	Catemaco	Veracruz de Ignacio de la Llave	75	454	X	Golfo Centro

Fuente: CONAGUA (2016).

Presas.

Otro tipo de agua superficial son las presas.

Existen más de 5 mil presas en México, algunas de las cuales están clasificadas como grandes presas. La capacidad de almacenamiento de las presas del país es de aproximadamente 150 mil millones de metros cúbicos

Se tiene un conjunto de 180 presas que representan el 80% del almacenamiento

del país. El volumen almacenado en estas presas al 2015 es de aproximadamente 102 mil millones de m³. Este volumen depende de la precipitación, los escurrimientos y el régimen de operación de las presas en las distintas regiones del país. (CONAGUA, 2016).

Los datos y distribución de las principales presas se muestran en el Cuadro 7. Se puede observar que las dos presas de mayor capacidad se encuentran en el estado de Chiapas, son: la Belisario Domínguez y la presa Nezahualcóyotl con un volumen útil para 2015 de 12,614.3 hm³ y 9,335.02 hm³ respectivamente, le sigue la presa Infiernillo localizada en Guerrero y Michoacán con un volumen útil de 7,142.3 hm³

Cuadro 7. Principales presas en México

Nombre Oficial	Nombre común	Capacidad al NAMO (hm ³)	Altura de la cortina (m)	Clave	Entidades federativas	Corriente en la que se ubica la presa	Volumen útil 2015 hm ³
Dr. Belisario Domínguez	La Angostura	13169	147	XI	Chiapas	Río Grijalva	12614.3
Nezahualcóyotl	Malpaso o Raudales	12373.1	138	XI	Chiapas	Río Grijalva	9335.02
Infiernillo	Infiernillo	9340	151.5	IV	Guerrero - Michoacán	Río Balsas	7142.83
Lago de Chapala	Chapala	7634	0	VIII	Jalisco	NA	4773.02
Presidente Miguel Alemán	Temascal	8119.1	75.75	X	Oaxaca	Río Tonto	6497.4
Aguamilpa Solidaridad	Solidaridad	5540	187	VIII	Nayarit	Río Santiago	5103.68
Internacional La Amistad	La Amistad	4040.33	87	VI	Coahuila - Texas	Río Bravo	2377.64
General Vicente Guerrero							
Consumador de la Independencia Nacional	Las Adjuntas	3264.81	62	IX	Tamaulipas	Río Soto La Marina	3878.87
Internacional Falcón	Falcón	3910.67	50	VI	Tamaulipas – Texas	Río Bravo	1881.79
Adolfo López Mateos	El Humaya o Varejonal	3086.61	105.5	III	Sinaloa	Río Humaya	2191.87

Fuente: CONAGUA (2016).

Agua subterránea.

Comprende el número de acuíferos fuentes de agua que funcionan a la vez como vasos de almacenamiento, redes de acueductos y plantas de tratamiento naturales.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El 38.9% del volumen total concesionado para usos consuntivos, es decir, 33,311 millones de metros cúbicos por año al 2015, pertenece a este origen. Se han definido 653 acuíferos para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo. La importancia del agua subterránea es mayor en países como México con extensas regiones áridas, donde el subsuelo suele ser la principal y la única fuente permanente de agua

Sin embargo, muchos de esos acuíferos se encuentran sobre explotados. Un acuífero se define como sobreexplotado o no, en función de la relación extracción/recarga. Al 31 de diciembre de 2015 existían 105 acuíferos en esta condición.

2.3.2 Demanda por agua

Usos del agua

La demanda por agua en México comprende los principales sectores que utilizan agua. El 76.3% del agua se utiliza en la agricultura, 14.5%, en el abastecimiento público, 4.8% en las termoeléctricas y 4.4% en la industria (CONAGUA, 2017a).

Uso Agrícola.

El mayor uso del agua en México es el agrícola. De acuerdo con el VII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal 2007, la superficie en unidades agrícolas de producción fue de 30.2 millones de hectáreas, de las cuales 18% eran de riego y el resto tenían régimen de temporal. La superficie sembrada anualmente (considerando el año agrícola y los cultivos perennes, en régimen de riego y

temporal) ha variado entre 21.4 y 21.9 millones de hectáreas durante el periodo 2006- 2016. Anualmente, la superficie cosechada en ese mismo periodo (considerando el año agrícola y cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) oscila entre 19.9 y 21.2 millones de hectáreas por año (*ibíd.*).

En el año 2016, la superficie sembrada bajo riego en México fue de 6.05 millones de hectáreas, de las cuales un poco más de la mitad se ubican en 86 distritos de riego, y el restante en más de 40 mil unidades de riego. El 36% del agua concesionada para uso agrupado agrícola es de origen subterráneo (*ibíd.*).

Uso Abastecimiento público.

El uso agrupado para abastecimiento público consiste en el agua entregada por las redes de agua potable, las cuales abastecen a los usuarios domésticos (domicilios), así como a diversas industrias y servicios.

La fuente predominante para el abastecimiento público es la subterránea, con el 58.5%, en el año 2016, la cantidad de agua superficial utilizada para este sector fue de 5.22 miles de hm³ y la de origen subterráneo es de 7.36 miles de hm³ (CONAGUA, 2017a)

Uso Industrial

En este rubro se incluye la industria que toma el agua que requiere directamente de los ríos, arroyos, lagos o acuíferos del país.

Las actividades secundarias, conocidas como “la industria”, están conformadas por los sectores de minería, electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, así como la construcción y las industrias manufacturera.

En el año 2016 se destinó el 56.8% del volumen de agua subterránea para el abastecimiento industrial, lo que equivale a 2.16 miles de hm³, mientras que de agua superficial el 43.2% correspondiente a 1.64 miles de hm³. En términos generales se utiliza un total de 3.8 miles de hm³ para abastecer a la industria (CONAGUA, 2017a)

Uso de agua en las termoeléctricas.

Las plantas termoeléctricas son de distintas clases: centrales de vapor duales, carboeléctricas, de ciclo combinado, de turbogás y de combustión interna, que usan consuntivamente el agua; se incluyen las tecnologías renovables (eólica, solar fotovoltaica y geotérmica). Se excluye la hidroelectricidad.

El agua se utiliza para producir electricidad y representa el 4.8% del volumen de extracción con un total de 4.15 miles de hm³ (Cuadro 8).

Cuadro 8. Uso agrupado del agua en México, 2016

Uso agrupado	Origen		Volumen total (miles de hm ³)	Porcentaje de extracción
	Superficial (miles de hm ³)	Subterráneo (miles de hm ³)		
Agrícola	42.21	23.84	66.05	76.3
Abastecimiento público	5.22	7.36	12.58	14.5
Industria autoabastecida	1.64	2.06	3.80	4.4
Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad	3.70	0.45	4.15	4.8
Total	52.77	33.81	86.58	100

Fuente: CONAGUA (2017a).

En lo que se refiere a las centrales hidroeléctricas, que representan un uso no consuntivo del recurso, se utilizaron en el país 125.6 miles de hm³ en el año 2016.

2.3.3 Grado de presión hídrica

El grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región es la relación entre el agua empleada en usos consuntivos respecto a su disponibilidad. Este indicador muestra que, si el porcentaje es mayor al 40%, entonces se ejerce una fuerte presión sobre el recurso. A escala nacional, México experimenta un grado de presión del 19.2%, lo cual se considera de nivel bajo; sin embargo, las zonas centro, norte y noroeste del país experimentan un alto grado de presión. (CONAGUA, 2017a).

A nivel de Región Hidrológica Administrativa, la que presenta el más alto grado de presión es la RHA XIII Aguas del Valle de México con 139.2% y la de menor es RHA V Frontera Sur con 1.5%. Las RHA que se presentan sin estrés son: V Pacífico Sur, X Golfo Centro y XI Frontera Sur (Cuadro 9).

Cuadro 9. Grado de presión del agua, 2016.

Clave	RHA	Volumen total de agua concesionado 2016(hm ³)	Agua renovable 2016 (hm ³ /año)	Grado de presión (%)	Calificación del grado de presión
I	Península de Baja California	3,959	4,876	81.2	Alto
II	Noroeste	6,748	8,274	81.6	Alto
III	Pacífico Norte	10,803	26,613	40.6	Alto
IV	Balsas	10,860	21,671	50.1	Alto
V	Pacífico Sur	1,570	30,836	5.1	Sin estrés
VI	Río Bravo	9,537	12,430	76.7	Alto
VII	Cuencas Centrales del Norte	3,835	7,926	48.4	Alto
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	15,852	34,897	45.4	Alto
IX	golfo Norte	5,957	28,663	20.8	Medio
X	Golfo Centro	5,632	65,645	8.6	Sin estrés
XI	Frontera sur	2,542	175,912	1.5	Sin estrés
XII	Península de Yucatán	4,498	29,647	15.2	Bajo
XIII	Aguas del Valle de México	4,782	3,437	139.2	Muy alto
	Total	86,577	450,828	19.2	Bajo

Fuente: CONAGUA (2017a)

2.4 Disponibilidad del agua en la Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera se encuentra asentada en lo que fue una enorme laguna de más de 100 kilómetros de largo y más de 50 de ancho. Durante todo este tiempo, mucha agua se evaporó, pero otra se infiltró para formar una gran reserva de más de 200 kilómetros de diámetro y más de 150 metros de profundidad, la cual se ha utilizado para la agricultura y consumo humano desde los primeros asentamientos en la región (El Siglo de Torreón, 2010).

Debido a su ubicación geográfica, la Región Lagunera se caracteriza por tener un clima árido a o semiárido y por presentar problemas en la disponibilidad del agua, debido a la baja precipitación que se presenta y a las sequías. La escasez de agua en la Comarca Lagunera es un problema que demanda inmediata solución, con el fin de asegurar el futuro de la vida de los pobladores, además de garantizar la calidad de la misma (ibíd.).

La Comarca Lagunera se encuentra en el Distrito de Riego 017 y comprende los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Nazas, Rodeo, Mapimí, San Juan de Guadalupe y Simón Bolívar, localizados en la porción noreste del estado de Durango; así como los municipios de Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca, localizados en la porción sureste del estado de Coahuila (Figura 2). Se ubica geográficamente en las Cuencas Centrales del Norte, específicamente en la Región Hidrológica 36 que se conforma por las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval. El DR 017 está integrado por 20 módulos de riego, de los cuales 17 corresponden al Río Nazas y tres al Río Aguanaval, con una superficie total de 223,822 ha dotadas y un volumen anual concesionado de 1,024 millones de m³ para regar 93,409 ha para beneficio de 37,956 usuarios. (Macías *et al*, 2007).



Figura 2. Área de localización del DR-017, Comarca Lagunera, México

Fuente: Ríos *et al* (2015)

2.4.1 Oferta del agua.

La oferta de agua de la Región Lagunera está conformada por el agua superficial y el agua subterránea.

Agua Superficial.

El agua de gravedad es el agua superficial que proviene de los ríos el Nazas y el Aguanaval, que actualmente se regula su afluente con las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco (Cuadro 10). El volumen total de agua extraído es de 2,177 millones de $\text{m}^3 \text{año}^{-1}$ de los cuales el 58% proviene del subsuelo y el 42% de aguas superficiales. De estos, el 87% se utiliza en la agricultura, el 9% en uso público, el 2% en uso industrial y el 2% restante en aspectos pecuarios (Macías *et al*, 2007).

La cantidad de agua que se almacena en las presas Lázaro Cárdenas y Francisco Zarco depende de las lluvias y los escurrimientos que se generan en la parte alta de la cuenca del río Nazas. El volumen promedio autorizado para el Distrito de Riego en los últimos 20 años es de 775 Millones de m^3 , para una superficie también promedio de siembra de 48,550 ha. En términos prácticos este volumen se genera en las tres principales cuencas ubicadas aguas arriba de la presa Lázaro Cárdenas, en la parte alta del río Nazas.

1. La cuenca del río Sardinias o del Oro produce en promedio 284 Mm^3 ; es decir 570 m^3 de agua por hectárea / año.
2. La cuenca del río Ramos produce en promedio 205 Mm^3 ; es decir 307 m^3 de agua por hectárea / año
3. Las cuencas de los ríos Santiago Papasquiario y Tepehuanes producen en promedio 286 Mm^3 ; es decir 430 m^3 de agua por hectárea / año.

El sistema de presas almacena los escurrimientos generados durante el año para ser utilizados en los 17 módulos del Distrito de Riego que cuenta con 33,360 usuarios (Estrada, 2014).

Cuadro 10. Capacidad de almacenamiento de las principales presas de la Región Lagunera

	Capacidad NAME (Mm ³)	Capacidad NAMO (Mm ³)	Volumen muerto (Mm ³)
Presa Lázaro Cárdenas	4,437.6	2,958.0	95.2
Presa Francisco Zarco	383.1	309.2	12.3

Fuente: Estrada (2014).

El suministro de agua de gravedad es manejado conjuntamente por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), la cual tiene responsabilidad para las presas y los canales principales, y los módulos, los cuales tienen responsabilidad para el manejo de los canales secundarios hasta la parcela a nivel granja (Cruz & Levine, 1998).

Agua Subterránea

El agua subterránea es el agua que se extrae del subsuelo y está distribuida en nueve acuíferos principales: Villa Juárez, Oriente Aguanaval, Nazas, Vicente Suarez, La Paila, Hércules, Principal Región Lagunera, Acatita y Las Delicias.

El acuífero Principal Región Lagunera provee más de las tres cuartas partes del suministro de irrigación; y tres acuíferos proveen cerca del 90% del suministro (Cruz & Levine, 1998). La extracción de agua subterránea está concentrada en los municipios de Torreón, Gómez Palacio, Lerdo, Francisco I Madero y San Pedro de las Colonias. La captación de agua para uso público-urbano está concentrada en la zona conurbada. Debajo de esta, en la faja fluvial del Nazas, destaca la batería de pozos del Sistema Rural Interestatal de Agua Potable de la región Lagunera, la cual alimenta a la red de acueductos que abastece a numerosas comunidades diseminadas en la llanura.

El agua subterránea está nominalmente bajo el control de Comisión Nacional del Agua, pero el control de la operación está en manos de los usuarios individuales, o en el caso del ejido, por la comunidad. El primer control de CONAGUA consiste

en la forma de manejar y administrar la concesión del uso para extraer un volumen anual máximo específico de cada pozo registrado.

2.4.2 Demanda por agua.

La demanda de agua en la Comarca Lagunera tiene diferentes consumidores. Por un lado, están los agricultores que a través de la agricultura de riego necesitan del abastecimiento del recurso hídrico; por el otro, compiten con el sector residencial, el cual está determinado por la zona de crecimiento urbano de la región. Otros sectores que también compiten por el recurso son la ganadería y la industria. La competencia por el agua está limitada a la cantidad del recurso existente.

La distribución de la demanda de agua en la Región Lagunera es de la siguiente manera: el 87.5% del agua tiene usos con fines agrícolas; el 9.6% es para abastecimiento público; el 1.9% del agua es utilizada por la industria; el 0.9% es utilizada por las termoeléctricas. La cobertura de agua potable para 2005 fue de 93% en la región; en el sector urbano de 98.8% y en el rural de 79.1% (CONAGUA, 2007, citado por Soto & Gómez, 2009).

Los municipios que conforman la Comarca Lagunera representan una demanda anual por agua potable igual a 127 millones de m³ más 1,143 millones de m³ para la agricultura. Toda esta agua es extraída del subsuelo. La magnitud y el crecimiento de la gran demanda por agua ha provocado sobreexplotación de los mantos acuíferos (El Siglo de Torreón, 2010).

2.4.3 Grado de presión hídrica

El porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. Se considera que, si el porcentaje es mayor al 40%, se ejerce una fuerte presión sobre el recurso. En la Región Lagunera se experimenta un grado de presión mayor al 47% (CONAGUA, 2007, citado por Soto & Gómez, 2009).

La disponibilidad de agua subterránea ha venido disminuyendo debido a cambios en el régimen natural de recarga, volumen concesionado o descarga natural comprometida, por lo que se ha modificado el valor de la disponibilidad media anual del agua (CONAGUA, 2015).

La Región Lagunera se encuentra por debajo del índice de disponibilidad de agua, ya que mientras la disponibilidad aceptable a nivel mundial es de 5,000 metros cúbicos por habitante por año, en la región apenas se llega a mil metros cúbicos por habitante por año. En 1995, la disponibilidad de agua en la región era de 3,567 metros cúbicos por habitante al año; en 1998, se encontraba en 1,163. De continuar con el uso ineficiente del recurso, la disponibilidad del recurso hidráulico podría situarse en 765 para el año 2020 (Canedo, 2013). De los nueve acuíferos de la Región Lagunera, seis se encuentran en déficit.

Actualmente el acuífero principal de la Región Lagunera tiene una recarga anual media de 534.1 millones de metros cúbicos anuales; el volumen concesionado de agua subterránea es de 647.539 millones de m³ anuales, lo que representa un déficit de 113.43 millones de m³ (Cuadro 11).

El máximo volumen de agua que se puede extraer en el acuífero Principal-Región Lagunera es de 518.9 millones de m³ anuales que corresponde al volumen de recarga media anual, por lo que no existe volumen de agua disponible para que se puedan otorgar concesiones o asignaciones.

Cuadro 11 Condición de los acuíferos de la Región Lagunera

Acuífero	R	DNC	VEAS			DMA	
			VCAS	VEALA	VAPTYR	VAPRH	Déficit
Cifras en millones de m³ anuales							
Villa Juarez Oriente	49.7	6.9	42.85	0	0	0	-0.06
Aguanaval Nazas	32.3	30	45.9	0	3.03	0	-46.69
Vicente Suarez	113.6	65.9	30.07	0	2.43	0	0
La Paila	4.8	0	8.74	0	1.78	0	-5.72
Hércules	14.7	0	24.59	67.16	0	0	-77.06
Principal-Región	5.5	0.1	0.45	0.02	0	0	0
Lagunera	534.1	0	647.53	0	0	0	-113.43
Acatita	5.6	0.2	7.53	0	0	0	-2.13
Las Delicias	6.2	0.2	4.12	1.51	0.03	0	0
Acatita	5.6	0.2	7.53	0	0	0	-2.13
Las Delicias	6.2	0.2	4.12	1.51	0.03	0	0

Claves: R: recarga total media anual; DNC: descarga natural comprometida; VEAS: volumen de extracción de aguas subterráneas; VCAS: volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; VEALA: volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; VAPTYR: volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPDA; VAPRH: volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; DMA: disponibilidad media anual de agua del subsuelo.

Fuente: DOF (2018)

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Teorías del valor y del precio

3.1.1 Teoría del valor de Adam Smith

Adam Smith aborda el tema de la teoría del valor en su obra *La riqueza de las Naciones*. Para él la palabra valor tiene dos significados distintos: el valor de uso y el valor de cambio. El *valor de uso* expresa la utilidad de algún objeto en particular y el *valor de cambio* expresa el poder de compra de otros bienes que confiere la propiedad de dicho objeto (Smith, 1994).

Hace la comparación entre cosas que tienen un gran valor de uso con frecuencia poseen poco o ningún valor de cambio como el agua y las que apenas tienen valor de uso, pero poseen un gran valor de cambio como lo son los diamantes. De ahí enfatiza el hecho de la importancia del valor de cambio de las cosas.

Un concepto importante de la teoría del valor de Adam Smith es el trabajo. Establece que el trabajo es la medida real del valor de cambio de todas las mercancías. El trabajo es la única medida universal y precisa del valor, o el único patrón mediante el cual se puede comparar los valores de distintas mercancías en cualquier tiempo y lugar.

El trabajo fue el primer precio, la moneda de compra primitiva que se pagó por todas las cosas. Toda la riqueza del mundo fue comprada al principio no con oro ni con plata sino con trabajo; y su valor para aquellos que la poseen y que desean intercambiarla por algunos productos nuevos es exactamente igual a la cantidad de trabajo que les permite comprar o dirigir.

El trabajo fue la moneda más originaria que sirvió para comprar y pagar todas las cosas. En el estado primitivo y rudo de la sociedad, que precede a la acumulación de capital y a la apropiación de la tierra, la única circunstancia que puede servir de norma para el cambio recíproco de diferentes objetos parece ser la proporción entre las distintas clases de trabajo que se necesitan para adquirirlos. Si una

nación de cazadores, le cuesta usualmente doble trabajo matar un castor que un ciervo, el castor, naturalmente, se cambiará o valdrá dos ciervos (Smith, 1994).

Aunque el trabajo es la medida real del valor de cambio de todas las mercancías, no es la medida con la cual su valor es habitualmente estimado. Es con frecuencia difícil discernir la proporción entre dos cantidades distintas de trabajo.

El tiempo invertido en dos tipos diferentes de labor no siempre bastará por sí solo para determinar esa proporción. Se tiene que considerar los diversos grados de esfuerzo soportado y destreza desplegada.

Adam Smith (1994) enfatiza que el intercambio de cada mercancía se estima al comparar una mercancía con otra que con trabajo.

Es más natural estimar su valor de cambio mediante la cantidad no de trabajo sino de alguna otra mercancía que pueda comprar. La mayoría de las personas entienden mejor lo que significa una cantidad de una mercancía concreta que una cantidad de trabajo. La una es un objeto claro y palpable; la otra es una noción abstracta que, aunque puede volverse suficientemente inteligible, en absoluto resulta tan natural y evidente. Es más lógico y natural estimar el valor de su mercancía según la cantidad de dinero, la mercancía por la cual las cambia, que según la cantidad de pan o cerveza, las mercancías por las cuales las intercambia sólo mediante de la intervención de otra mercancía; y es más lógico que se afirme que la carne del carnicero vale tres o cuatro peniques por libra, y no que se diga que vale tres o cuatro libras de pan, o tres o cuatro cuartillos de cerveza.

El valor de cambio de toda mercancía es habitualmente estimado según la cantidad de dinero que se obtiene por ella, y no según la cantidad de trabajo o de alguna otra mercancía que se obtiene a cambio de ella. Pero el oro y la plata, como cualquier otra mercancía, cambian de valor, y a veces son más caros y otras veces más baratos, unas veces más fáciles y otras más difíciles de comprar.

La cantidad de trabajo que cualquier cantidad dada de ellas puede comprar o

dirigir, o la cantidad de otros bienes por la que se puede cambiar, depende siempre de la riqueza o pobreza de las minas conocidas cuando tiene lugar el intercambio. El trabajo exclusivamente, entonces, al no variar nunca en su propio valor, es el patrón auténtico y definitivo mediante el cual se puede estimar y comparar el valor de todas las mercancías en todo tiempo y lugar. Es su precio real; y el dinero es tan sólo su precio nominal (Smith, 1994).

3.1.2 Teoría del valor de David Ricardo

La teoría del valor de David Ricardo está plasmada en su libro Principios de Economía Política y Tributación. Retoma la teoría del valor-trabajo de Adam Smith (Ricardo, 2003).

David Ricardo difiere de Adam Smith de que la utilidad sea la medida del valor de cambio. Sin embargo, una característica importante de una mercancía para tener valor es que posea utilidad. Si un artículo no es útil para nada –en otras palabras, si es incapaz en modo alguno de contribuir a nuestra satisfacción-, carecería de valor de cambio por más escaso que fuera y cualquiera que fuese la cantidad de trabajo necesaria para conseguirlo.

Las dos fuentes de valor de cambio de las mercancías se derivan de su escasez y de la cantidad de trabajo que su obtención requiere.

Las mercancías cuyo valor está determinado por su escasez ningún trabajo podrá incrementar la cantidad de dichos bienes, y por tanto su valor no se verá disminuido por una oferta mayor. Tal el caso de algunas estatuas o pinturas excepcionales, libros o monedas raras, vinos de una calidad peculiar, que sólo pueden ser elaborados con uvas cultivadas en una tierra especial, de oferta muy limitada. Su valor es enteramente independiente de la cantidad de trabajo necesaria para producirlas, y varía según el grado de riqueza y las inclinaciones de los que desean poseerlas. Sin embargo, estos bienes constituyen una parte pequeña de los artículos que se cambian diariamente en el mercado (Ricardo, 2003).

La gran mayoría de los bienes que son objeto de deseo se obtienen por medio del trabajo; y pueden ser multiplicadas no sólo en un país, sino en muchos, casi sin límite alguno, si se emplea el trabajo necesario para obtenerlas. Por lo que, cuando se habla de valor en cambio y de las leyes que regulan sus precios respectivos, se refiere siempre a aquellos bienes cuya cantidad puede ser aumentada por el esfuerzo de la industria humana y en cuya producción la competencia actúa sin restricciones.

La cantidad de trabajo cristalizada en los bienes determina su valor de cambio, cualquier aumento de la cantidad de trabajo, debe elevar el valor de ese bien sobre el que se ha aplicado, así como cualquier disminución debe reducir su valor.

El valor de una mercancía, o la cantidad de cualquier otra mercancía por la que pueda intercambiarse, depende de la cantidad relativa de trabajo necesaria para su producción, y no de la compensación mayor o menor que se paga por dicho trabajo. El valor de los bienes resulta afectado por el trabajo que se les aplica de inmediato y además por el trabajo que se empleó en los instrumentos, herramientas y edificios con que se complementa el trabajo inmediato.

La cantidad relativa de bienes que el trabajo produce es lo que determina su valor relativo presente o pasado, y no las cantidades relativas de bienes que se entregan al trabajador a cambio de su labor (*ibíd.*).

3.1.3 Teoría marxista del valor.

La teoría Marxista del valor se centra en los dos factores de la mercancía: valor de uso y valor (sustancia del valor, magnitud del valor).

Valor de uso. La utilidad de un objeto lo convierte en valor de uso. Esta utilidad está condicionada por las cualidades materiales de la mercancía y que no puede existir sin ellas. Lo que constituye un valor de uso de un bien es, la materialidad de la mercancía misma. El valor de uso sólo toma cuerpo en el uso o consumo de los objetos.

Los valores de uso forman el contenido material de la riqueza son, además, el soporte material del valor de cambio.

Valor de cambio. El valor de cambio aparece como la relación cuantitativa, la proporción en que se cambian valores de uso de una clase por valores de uso de otra, una relación que se modifica constantemente según el tiempo y el lugar.

En la teoría Marxista del valor existen dos elementos importantes interrelacionados: a) el tiempo de trabajo socialmente necesario y b) la fuerza productiva del trabajo (Marx, 2010)

El tiempo de trabajo socialmente necesario.

Es llamado la "sustancia generadora de valor". La cantidad de trabajo se mide por su duración, y el tiempo de trabajo, a su vez, reconoce su patrón de medida en determinadas fracciones temporales, tales como hora, día, etcétera humano. Por tanto, las mercancías que contienen cantidades iguales de trabajo, o que se pueden producir en el mismo tiempo de trabajo, tienen la misma magnitud de valor. El valor de una mercancía es al valor de cualquier otra, como el tiempo de trabajo necesario para la producción de la una es al tiempo de trabajo necesario para la producción de la otra. La magnitud de valor de una mercancía se mantendría constante, por consiguiente, si también fuera constante el tiempo de trabajo requerido para su producción. Pero éste varía con el cambio en la fuerza productiva del trabajo (*ibíd.*).

La fuerza productiva del trabajo.

La fuerza productiva del trabajo está determinada por múltiples circunstancias, entre otras por el nivel medio de destreza del obrero, el estadio de desarrollo en que se hallan la ciencia y sus aplicaciones tecnológicas, la coordinación social del proceso de producción, la escala y la eficacia de los medios de producción, las condiciones naturales. En términos generales: cuanto mayor sea la fuerza productiva del trabajo, tanto menor será el tiempo de trabajo requerido para la producción de un artículo, tanto menor la masa de trabajo cristalizada en él, tanto

menor su valor. A la inversa, cuanto menor sea la fuerza productiva del trabajo, tanto mayor será el tiempo de trabajo necesario para la producción de un artículo, tanto mayor su valor.

Un objeto puede tener valor de uso sin tener valor. Así acontece cuando la utilidad que ese objeto encierra para el hombre no se debe al trabajo. Es el caso del aire, de la tierra virgen, de las praderas naturales, de los bosques silvestres, etc. Y puede, asimismo, un objeto ser útil y producto del trabajo humano sin ser mercancía.

Los productos del trabajo destinados a satisfacer las necesidades personales de quien los crea son, indudablemente, valores de uso, pero no mercancías. Para producir mercancías, no basta producir valores de uso, sino que es menester producir valores de uso para otros, valores de uso sociales. (Y no sólo para otros, pura y simplemente. El labriego de la Edad Media producía el trigo del tributo para el señor feudal y el trigo del diezmo para el cura; y, sin embargo, a pesar de producirlo para otros, ni el trigo del tributo ni el trigo del diezmo eran mercancías. Para ser mercancía, el producto ha de pasar a manos de otro, del que lo consume, por medio de un acto de cambio). Finalmente, ningún objeto puede ser un valor sin ser a la vez objeto útil. Si es inútil, lo será también el trabajo que éste encierra; no contará como trabajo ni representará, por tanto, un valor.

Los valores de uso o lo que es lo mismo, las mercancías consideradas como objetos corpóreos, son combinaciones de dos elementos: la materia, que suministra la naturaleza, y el trabajo.

El trabajo cuya utilidad viene a materializarse así en el valor de uso de su producto o en el hecho de que su producto sea un valor de uso, es lo que llamamos, resumiendo todo eso, trabajo útil. Considerado desde este punto de vista, el trabajo se revela siempre asociado a su utilidad (Marx, 2010)

3.1.4 Teoría neoclásica de la escasez

El principio de escasez —uno de los dos principios básicos de la teoría

económica— postula que los bienes económicos disponibles son limitados, mientras que las necesidades materiales de la sociedad son crecientes. Este concepto se refiere a la relación entre la oferta y la demanda de un determinado bien. Con necesidades ilimitadas y recursos limitados no se puede tener plena satisfacción de todo lo que se necesita y, por lo mismo, se debe elegir entre varias alternativas (Ávila, 2004).

La escasez es el concepto central de la economía neoclásica. La escasez justifica el análisis de la oferta y la demanda. Da a los precios su papel crucial. Gobierna el comportamiento de la economía. Los economistas neoclásicos dan mucha importancia a la asignación de recursos y definen las técnicas de la optimización condicionada como el esquema de la economía neoclásica. En la teoría económica neoclásica el principio de la escasez es uno de los factores más importantes en la formación del precio de los bienes y servicios en una economía (Churión, 1994).

Cuando todos los recursos son escasos y están totalmente utilizados, todas las cuestiones giran alrededor del uso adecuado de los recursos existentes más que sobre la creación de nuevas mercancías. La escasez es particularmente evidente en los modelos de intercambio puro. Las hipótesis complementarias que se pueden encontrar en los diversos modelos sofisticados de producción neoclásicos han sido introducidas precisamente para garantizar todas las condiciones y resultados principales del modelo de intercambio puro. La producción en la economía neoclásica es una forma de intercambio indirecto entre agentes consumidores individuales después llamados productores.

La escasez es un estado de cosas en que, dadas las necesidades de la sociedad en determinado momento, los medios disponibles para satisfacerlas resultan insuficientes. Es la disponibilidad limitada de recursos económicos para la producción de bienes y servicios, con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad en su conjunto; se presenta cuando la oferta de una mercancía es inferior a la demanda.

El principio de la escasez está determinado por la demanda. La escasez natural de bienes y servicios en el mercado implica que los productos suben de precio, pero si dichos artículos se encuentran agotados en el mercado interno se tendrán que importar, resultarán caros y, en ciertos casos, deberán ser subsidiados, con el objeto de no elevar el precio al consumidor (Ávila, 2004).

La distinción entre mercancías reproducibles y mercancías escasas es una de las características sobresalientes de la teoría neoclásica. Las mercancías reproducibles son aquellas mercancías cuya cantidad puede ser aumentada por el trabajo humano y en cuya producción la competencia actúa sin restricciones.

Los neoclásicos centraron el análisis económico en los problemas relacionados con las mercancías escasas. Consideraban la riqueza social como el conjunto de cosas materiales o inmateriales que son escasas, es decir, que por una parte son útiles y, por otra, existen a nuestra disposición en cantidades limitadas.

Las cosas son útiles cuando pueden usarse para algo, cuando responden a una necesidad cualquiera y permiten su satisfacción. Las cosas se encuentran a nuestra disposición sólo en cantidades limitadas desde el momento en que no existen en cantidades tales, que pueden ser utilizadas a discreción para satisfacer las necesidades.

Hay ciertas cosas útiles que se encuentran a nuestra disposición en cantidades ilimitadas. Por ejemplo, el aire atmosférico, la luz y el calor del sol cuando el sol ha salido, el agua de los lagos corrientes y ríos se encuentra en tal cantidad que nadie puede faltarle; cada uno puede tomar toda la que quiera. Estas cosas que son útiles, no son generalmente escasas y, por lo tanto, no forman parte de la riqueza social; sólo excepcionalmente pueden escasear y, por ello, entrar a formar parte de la riqueza social (Walras, 1987).

La limitación en la cantidad de las cosas útiles, lo cual les proporciona escasez, tiene tres consecuencias:

1. Las cosas útiles y limitadas en su cantidad son apropiables. Las cosas

inútiles escapan a la apropiación; nadie trata de apropiarse de cosas que no tienen uso alguno. Las cosas que son útiles pero que existen en cantidades ilimitadas, tampoco son apropiables. Por el contrario, las cosas útiles, al no existir más que en cantidades limitadas, son apropiables y objeto de apropiación, este tipo de cosas son abarcables o controlables.

2. Las cosas útiles, limitadas en cantidad, son valiosas e intercambiables. Una vez que las cosas escasas son objeto de apropiación se establece entre las mismas una relación consistente en que cada una adquiere, como propiedad especial, la facultad de cambiarse entre sí en tal o cual proporción determinada.
3. Las cosas útiles, limitadas en cantidad, son industrialmente producibles o multiplicables. Existen cosas útiles, pero en cantidad ilimitada; uno debe ocuparse de utilizarlas, pero no de aumentar su cantidad. Existen cosas útiles y limitadas en cantidad, las cosas escasas; es claro que sólo éstas pueden ser objeto de estudio y actuación encaminadas a hacer su cantidad menos limitada de lo que es; y es igualmente claro que todas estas cosas, sin excepción, pueden y deben ser objeto de estudio y actuación (Walras, 1987).

La utilidad es "absolutamente esencial" para el valor (normal), aunque no su medida; mientras que el valor de las cosas "de las que hay una cantidad muy limitada... varía con la riqueza y las inclinaciones de aquellos que están deseosos de poseerlas." Las fluctuaciones del mercado de precios son determinados por la cantidad disponible para la venta, por un lado, y "las necesidades y los deseos de la humanidad", por otro. Es por ello que el valor depende enteramente de la utilidad" (Marshall, 1920). Y dado que la escasez y el valor de cambio son dos fenómenos proporcionales y concomitantes, se sigue que la escasez es la causa del valor (Walras, 1987).

Sobre esta base surge el concepto de utilidad marginal, dependiente de la cantidad de bien disponible; la existencia de bienes libres, como el aire, sin utilidad marginal por su abundancia; el costo marginal, que varía según la

cantidad producida; la productividad marginal, que es distinta según el grado en que se incrementa un factor productivo sin variar los restantes; la rentabilidad marginal, vinculada al volumen de las ventas; y otros conceptos similares relacionados con la relativa escasez de los bienes. Pero, tal vez, el concepto más importante que deriva de este principio es el de costo. Si los bienes fueran abundantes, no existiría el costo, que, en su expresión esencial, es la renuncia al empleo alternativo de bienes escasos, en la imposibilidad de satisfacer todas las necesidades integralmente (Araneda, 1993).

3.2 Teoría del mercado del agua

3.2.1 Mercado

Desde que el agua tiene un valor económico, la asignación eficiente entre los diversos usuarios juega un papel muy importante en la optimización económica del agua. Por lo mismo, los precios de mercado del agua que se establecen varían de un sector a otro. En un mercado perfectamente competitivo, normalmente hay un solo precio: el precio de mercado. Las dimensiones del mercado están determinadas por sus límites, tanto desde el punto de vista geográfico como desde el punto de vista de la variedad de productos que comprende (Pindick & Rubinfeld, 2001). En el caso del agua las dimensiones del mercado varían de un estado a otro y de un país a otro.

Para entender mejor el comportamiento de los precios, se analiza a través de las curvas de oferta y de demanda (Figura 3).

La curva de demanda indica cuánto están dispuestos a comprar los consumidores de un bien cuando varía el precio unitario. Se expresa matemáticamente de la siguiente forma:

$$Q_D = Q_D(P)$$

La curva de oferta, S, muestra la cantidad que están dispuestos los productores a vender de un bien a un precio dado, manteniendo constante los demás factores

que afectan la cantidad ofrecida. La curva de oferta es una relación entre la cantidad ofrecida y el precio y se expresa de la siguiente forma:

$$Q_s = Q_s(P)$$

El mecanismo de mercado es la tendencia al equilibrio, situación en la cual la cantidad ofrecida y la cantidad demandada son iguales.

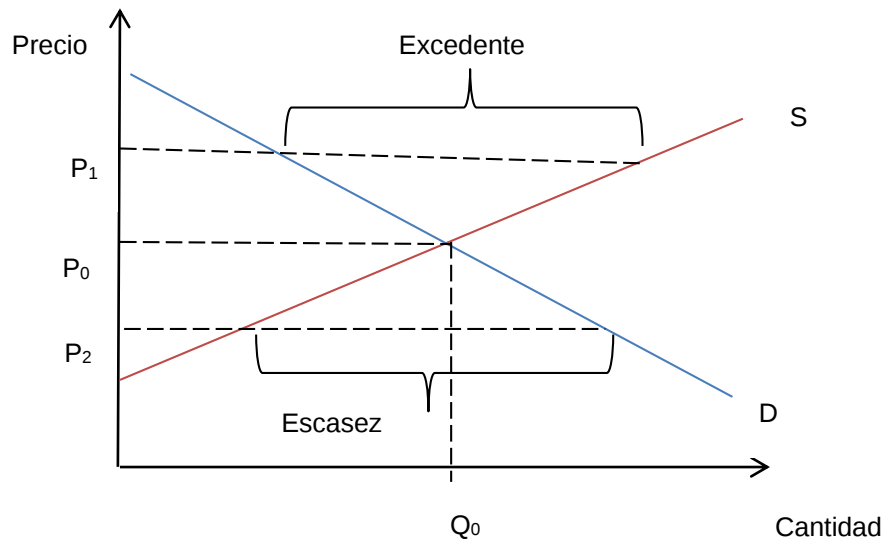


Figura 3. Curva de oferta y demanda

Fuente: Pindick & Rubinfeld (2001)

Si el precio fuera P_1 , los productores tratarán de producir y vender más de lo que los consumidores dispuestos a comprar. Habrá un excedente, la cantidad ofrecida es mayor a la cantidad demandada. Para venderlo o para impedir, al menos que siguiera creciendo, los productores comenzarían a bajar los precios. Finalmente, al descender el precio, la cantidad demandada se incrementa y la cantidad ofrecida disminuye hasta que se alcanzara el precio de equilibrio P_0 . En el caso contrario, si al inicio el precio fuera P_2 , inferior al precio de equilibrio, entonces habría escasez y la cantidad demandada sería inferior a la ofrecida, por lo que los consumidores no podrían comprar todo lo que desearían, lo cual haría subir el precio, ya que los consumidores estarían dispuestos a pagar un precio más alto y los productores reaccionarían elevando el precio e incrementando la producción, alcanzándose el nivel de equilibrio P_0 . (Pindick & Rubinfeld, 2001).

Cuando en el mercado del agua se presenta escasez, la oferta del recurso no cubre la demanda y surgen conflictos entre los diferentes usuarios del servicio.

Con frecuencia, el agua se asigna con criterios sociales y políticos y con subsidios y no se deja a las fuerzas de la oferta y de la demanda. Por ello, el precio del agua no refleja la escasez y no se comporta como la teoría económica predice (Van der Zaag & Savenije, 2006).

El agua debe tener un precio con el fin de lograr dos objetivos, a saber, recuperar el costo de la prestación del servicio de agua y dar una señal clara a los usuarios de que el agua es un bien escaso que debe ser utilizado de manera razonable.

El mercado del agua no es homogéneo. Los diferentes sectores: agricultura, industria, energía, transporte, y usos, como el doméstico, tienen diferentes características. Hay usos importantes del agua que tienen una alta relevancia social pero que sus beneficiarios tienen una capacidad muy limitada para pagar. Es el caso del uso del agua para los pobres y para las actividades culturales.

Elasticidad-precio de la demanda del agua.

La elasticidad precio de la demanda se define como el porcentaje de aumento de la demanda que resulta de un aumento porcentual unitario en el precio:

$$\epsilon_p = \frac{dQ/dp}{Q/p}$$

Esta elasticidad es un número negativo, ya que la demanda disminuye a medida que los precios aumentan y para el agua oscilan normalmente entre -1 y 0. El problema es que ϵ_p no es una constante; depende del precio, y este depende del tipo de uso del agua y varía con el tiempo (Tomek & Kaiser, 2014).

Los usos primarios del agua tienen una característica especial: la elasticidad se vuelve rígida o inelástica, con una ϵ_p cercana a cero. Es el caso más cercano a las necesidades más esenciales del usuario (Figura 4), en el que la gente necesita agua, sea cual sea el precio. Y para el uso más esencial de agua, que

es el uso como agua potable no existen alternativas.

Para sectores como la industria y la agricultura, la demanda de agua es generalmente más elástica, con ϵ_p más cerca de -1. Esto se debe, en cierta medida, a que es posible alcanzar una mayor eficiencia, como, por ejemplo, con la introducción de tecnologías de producción ahorradoras de agua o con el cambio hacia productos o cultivos que requieran menos agua (Savenije & Van der Zaag, 2006).

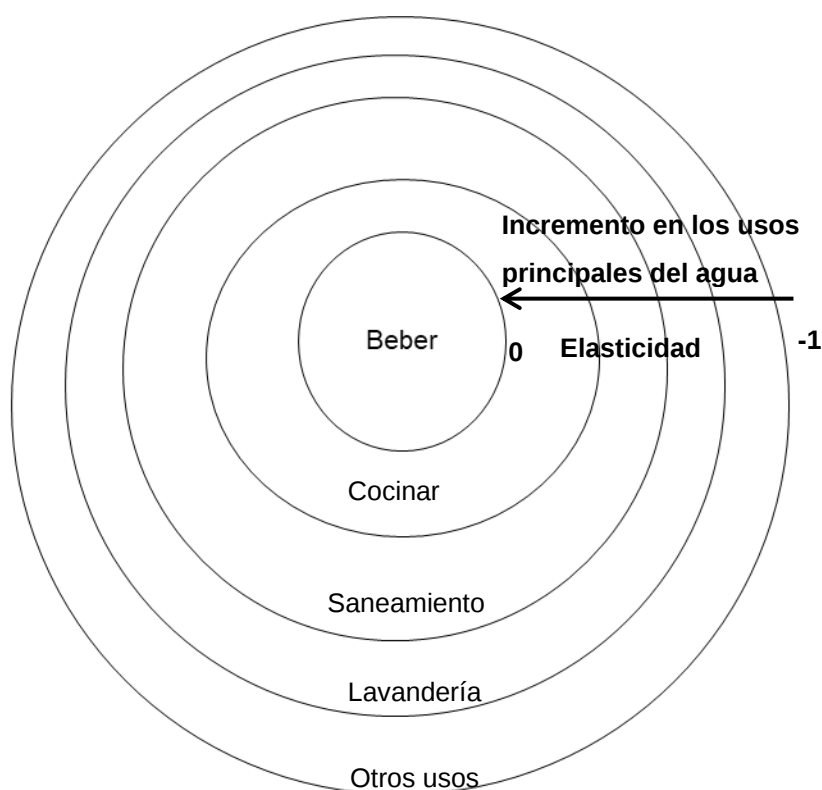


Figura 4. Usos del agua doméstica y elasticidades-precio de la demanda.

Fuente: Savenije & Van der Zaag (2002).

El incremento del sistema de tarifas por bloque —por muchas sociedades aceptadas como el logro del compromiso entre la eficiencia económica y la equidad social para el abastecimiento de agua para uso doméstico—, plantea una paradoja interesante.

El precio del agua es bajo donde presenta un valor de uso más alto (los requisitos

más esenciales, tales como beber y cocinar); el precio del agua es más alto donde presenta un valor de uso más bajo (usos menos esenciales, tales como el lavado de un coche (Savenije & Van der Zaag, 2006).

Excedente del consumidor.

Una curva de demanda del mercado muestra las cantidades de lo bueno que sería comprar a distintos precios. En la Figura 5 se muestra una curva de demanda hipotética para el mercado del agua, P_1 indica el precio inicial de equilibrio del mercado y Q_1 muestra la cantidad demandada a este precio. El área triangular encima del precio de mercado y por debajo de la curva de demanda (área abP_1 en la Figura 5) es una estimación de los beneficios netos generados por Q_1 , unidades de agua compradas al precio P_1 .

Se llama el excedente del consumidor y representa la cantidad que estarían dispuestos a pagar los consumidores por la cantidad Q_1 (área $0abQ_1$) menos lo que realmente deben pagar por Q_1 , (área $0P_1bQ_1$). Si el precio de mercado se eleva a P_2 y todos los demás factores que afectan a la demanda se mantienen constantes, entonces la cantidad demandada se reduciría a Q_2 .

El área que representa el excedente del consumidor sería P_2ac y la pérdida de beneficios debido al incremento de precios sería la disminución del excedente al consumidor, el área P_1P_2cb .

El enfoque del excedente del consumidor es útil en la valoración de agua cuando una curva de demanda de agua se puede estimar. El excedente del consumidor también proporciona una base conceptual para muchos de los enfoques de valoración de mercado que se han desarrollado (Colby, 1989).

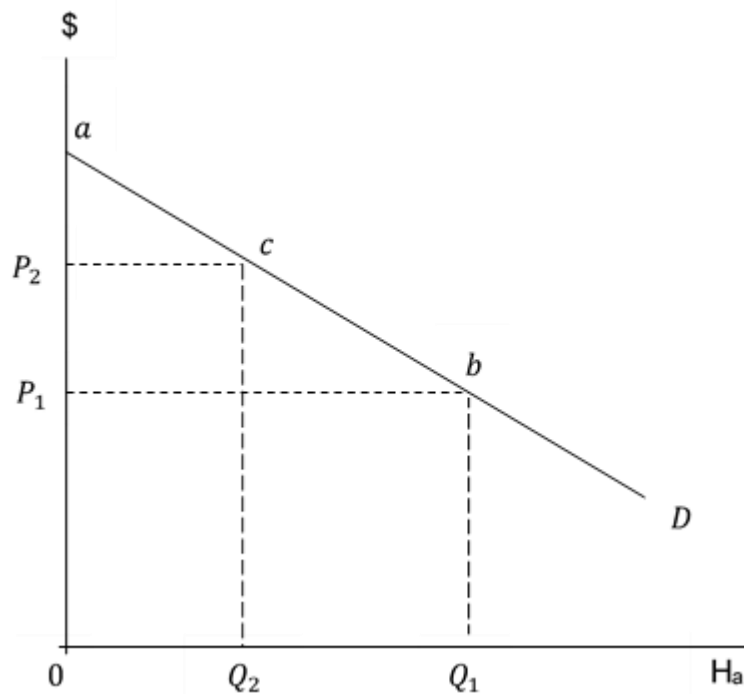


Figura 5. Excedente del consumidor.

Fuente: Colby (1989)

3.2.2 Eficiencia económica.

La eficiencia en el sentido de Pareto analiza las formas eficientes de elegir entre los vectores factibles de consumo. Sean vectores agregados de consumo $C = (X_1, X_2)$, lo que quiere decir que pueden consumirse X_1 unidades del bien 1 y X_2 del bien 2. Una vez que se conoce la cantidad total de cada bien, se traza una caja de Edgeworth (Figura 6). La caja de Edgeworth es un instrumento gráfico para analizar el intercambio de dos bienes entre dos personas. Para comprender la caja de Edgeworth se analizan las curvas de indiferencia y las dotaciones de los individuos examinados. Sean los individuos A y B y los dos bienes, 1 y 2. La cesta de consumo de A es $X_A = (x_A^1, x_A^2)$, donde x_A^1 y x_A^2 representan, respectivamente el consumo del bien 1 y del 2 por parte de A; así, la cesta de consumo de B es $X_B = (x_B^1, x_B^2)$ (Varian, 2006).

El par de estas cestas de consumo X_A y X_B se llama asignación. Una asignación es viable si la cantidad total utilizada de cada bien es igual a la cantidad total

disponible:

$$x_A^1 + x_B^1 = w_A^1 + w_B^1$$

$$x_A^2 + x_B^2 = w_A^2 + w_B^2$$

La asignación correspondiente inicial, (w_A^1, w_A^2) y (w_B^1, w_B^2) es la asignación de la que parten los consumidores. Está formada por la cantidad que llevan de cada bien al mercado (*ibíd.*).

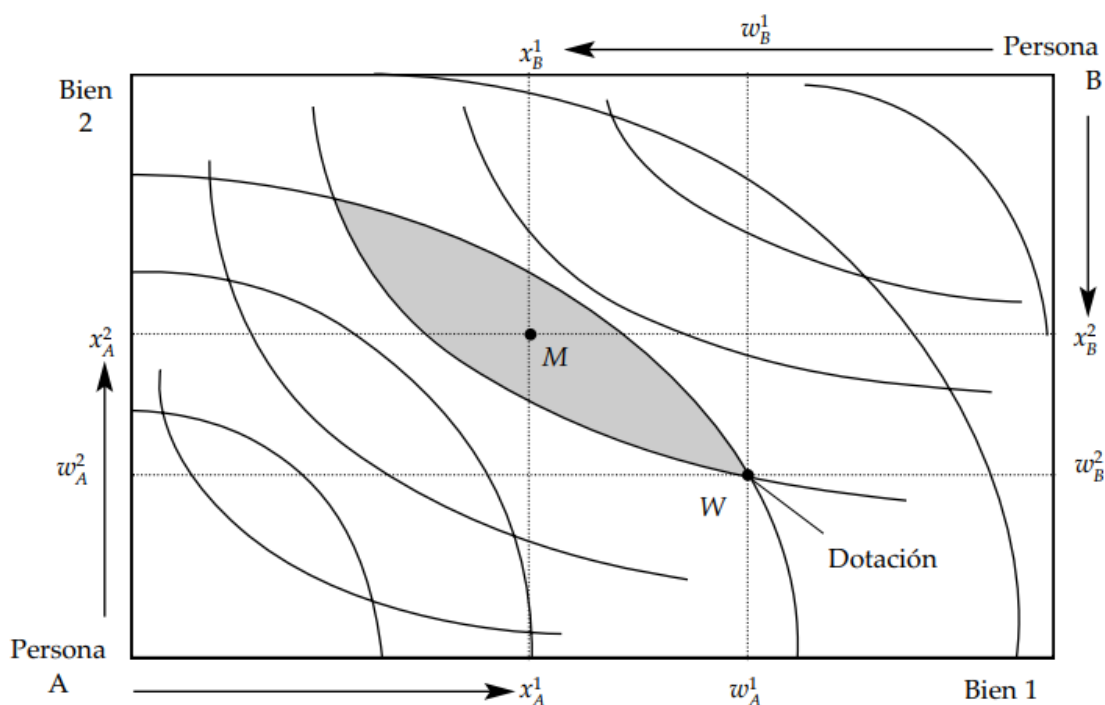


Figura 6. Caja de Edgeworth.

Fuente: Varian (2006)

En el punto M de la Figura 7, el conjunto de puntos situados por encima de la curva de indiferencia de A no corta al conjunto de puntos situados por encima de la curva de indiferencia de B. El área en la que mejora el bienestar de A no tiene ningún punto en común con el área en la que mejora el bienestar de B. Eso significa que cualquier movimiento que mejore el bienestar de una de las partes empeora necesariamente el de la otra. Por lo tanto, en esa asignación no hay

ningún intercambio ventajoso para las dos personas.

Una asignación eficiente en el sentido de Pareto como la M, cada una de las personas se encuentra en su curva de indiferencia más alta posible, dada la curva de indiferencia de la otra (Figura 7). La línea que conecta esos puntos se denomina curva de contacto o de conflicto.

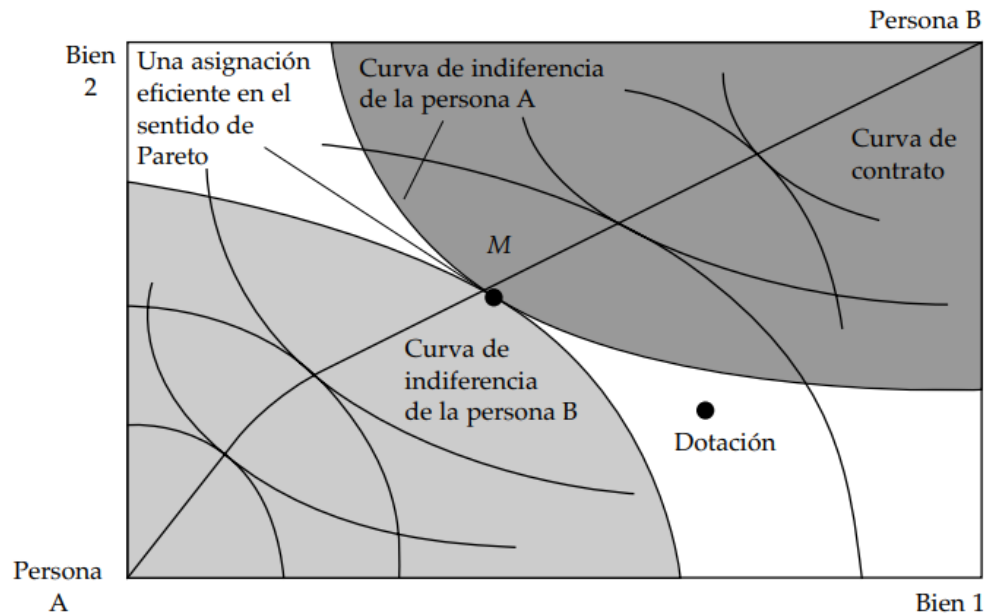


Figura 7. Asignación eficiente en el sentido de Pareto

Fuente: Varian (2006)

De acuerdo a Varian (2006), una asignación eficiente en el sentido de Pareto es aquella en la que:

- ☐ No es posible mejorar el bienestar de todas las personas involucradas
- ☐ No es posible mejorar el bienestar de una de ellas sin empeorar el de la otra
- ☐ Se han agotado todas las ganancias derivadas del comercio
- ☐ No es posible realizar ningún intercambio mutuamente ventajoso

Dado (X_1, X_2) , los niveles de consumo eficientes en el sentido de Pareto se encontrarán a lo largo del Conjunto de Pareto, es la línea de tangencias mutuas

de las curvas de indiferencia. Éstas son las asignaciones en las que las relaciones marginales de sustitución de ambos consumidores —la relación a la que están dispuestos a comerciar—son iguales. Estas asignaciones son eficientes en el sentido de Pareto, en lo que se refiere a las decisiones de consumo. Si los individuos se limitan a intercambiar un bien por otro, el conjunto de Pareto describe el conjunto de vectores de consumo que absorbe todas las ganancias derivadas del comercio. Pero en una economía en la que haya producción, existe otra forma de “intercambiar” un producto por otro, a saber, aumentar la producción de uno y reducir la del otro (*ibíd.*).

En una asignación eficiente en el sentido de Pareto, la tasa marginal de sustitución (TMS) del consumidor A tiene que ser igual a la del B: la relación a la que el consumidor A estaría dispuesto a intercambiar un bien por el otro debe ser igual a la relación a la que el B estaría dispuesto a intercambiarlo. Si esto no fuera así, habría algún intercambio que mejoraría el bienestar de ambos consumidores.

La tasa marginal de transformación (TMT) mide la tasa a la que un bien puede “transformarse” en el otro, es decir, la tasa a la que se reduce la producción de uno y para aumentar la del otro en una unidad.

Si la economía se encontrara en una posición en la que la tasa marginal de sustitución de uno de los consumidores no fuera igual a la tasa marginal de transformación entre los dos bienes, esa posición no podría ser eficiente en el sentido de Pareto, porque en ese punto la relación a la que el consumidor estaría dispuesto a intercambiar el bien 1 por el 2 sería diferente de la relación a la que podría transformarse el bien 1 en el 2. En ese caso, sería posible aumentar el bienestar del consumidor modificando la producción.

Supongamos que la TMS del consumidor es 1; está dispuesto a sustituir una unidad del bien 2 por una del 1. Supongamos que la TMT es 2, lo que significa que renunciando a una unidad del bien 1 la sociedad puede producir 2 unidades del bien 2. En ese caso, tiene sentido reducir la producción del bien 1 en una unidad, ya que se obtienen dos unidades adicionales del bien 2. Dado que el

consumidor es indiferente entre renunciar a una unidad del bien 1 y obtener una del otro a cambio, ahora disfruta indudablemente de un mayor bienestar al obtener dos unidades adicionales del bien 2. Este argumento es válido siempre que uno de los consumidores tiene una TMS diferente de la TMT: siempre es posible reordenar el consumo y la producción de tal manera que aumente el bienestar del consumidor.

Una asignación eficiente en el sentido de Pareto tiene la propiedad de que las curvas de indiferencia de ambos consumidores tienen la misma pendiente en ese punto y esa pendiente es igual a la pendiente representada por la TMT(Varian, 2006).

En una economía de intercambio puro, el equilibrio competitivo es eficiente en el sentido de Pareto. Este hecho se conoce con el nombre de primer teorema de la economía del bienestar. El primer teorema de la economía del bienestar afirma que las asignaciones del equilibrio general de la economía son Pareto-óptimas.

El segundo teorema de la economía del bienestar postula que es posible instrumentar una asignación Pareto óptima como una asignación del equilibrio general de la economía con transferencias de ingreso, si los ordenamientos parciales ($\succsim$) son convexos, continuos y estrictamente monótonos; si $(\hat{X}, \hat{Y})$ es una asignación óptima de Pareto en la que cada unidad familiar mantiene cantidades positivas de cada bien, y si los conjuntos de posibilidades de producción de las empresas, y_φ , para $\varphi = 1, 2, \dots, m$, son convexos (Varian, 1992).

3.3 Importancia del agua en la agricultura.

3.3.1 Importancia del agua en la producción agrícola

La relación entre el agua y la vida humana es clara en las regiones áridas, donde el riego es indispensable para la producción de alimentos. Sin embargo, la importancia de esta característica especial del agua tiende a ocultar el hecho de que, en la mayoría de las sociedades, lo que se utiliza efectivamente como agua

potable y para la conservación de la vida es sólo una mínima parte del consumo total. En realidad, gran parte de la utilización urbana de agua se destina a fines de comodidad y confort. En el árido oeste de los Estados Unidos, la utilización de agua por persona en los hogares supera en muchos casos los 400 litros diarios, de los cuales aproximadamente la mitad se destina al riego de céspedes y jardines; del resto, la mayor parte se gasta en las cisternas de los retretes, en bañarse y en lavar los automóviles. (FAO, 1993).

3.3.2 El agua y la seguridad alimentaria

En 1948, la Declaración Universal de los Derechos Humanos afirmó el derecho de todas las personas a una alimentación adecuada. Sin embargo, el acceso a una alimentación adecuada en las zonas rurales de muchos países en desarrollo depende en gran medida del acceso a los recursos naturales, incluida el agua, que son necesarios para producir alimentos tanto para el consumo directo como para actividades generadoras de ingresos que permitan a las personas comprar alimentos. La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró el 28 de julio de 2010 que el acceso al agua potable y la sanidad es un derecho humano. El acceso al agua potable en cantidad suficiente es un derecho humano al amparo del derecho internacional y figura en la constitución de algunos países. Sin embargo, el derecho al agua en el contexto del derecho a la alimentación es una cuestión compleja. Mientras que el agua potable y para cocinar estaría protegida, el agua para la producción de alimentos probablemente no quedaría comprendida entre las necesidades mínimas de las zonas áridas, ya que la producción agrícola requiere volúmenes tan elevados de agua (FAO, 2012).

Las características que definen el derecho al agua son:

- Suficiente, es decir, en cantidad adecuada, de acuerdo con las directrices internacionales (lo que normalmente significa 40 a 50 L / día por persona, con un mínimo absoluto de 20 L);
- Segura y aceptable, es decir, segura para cada uso (que cumpla con estándares muy altos cuando se usa para beber), y de un color aceptable,

olor y sabor, físicamente accesible, es decir, con un alcance físico, dentro de la casa o cerca del hogar;

- Asequible, es decir, para no afectar la capacidad de una persona para comprar otros bienes esenciales.

Las personas que tienen mayor acceso al agua tienden a disfrutar de una nutrición mejor. La falta de agua puede ser una de las principales causas de las hambrunas y la malnutrición, particularmente en las zonas donde la alimentación y los ingresos de las personas dependen de la agricultura local. Las lluvias irregulares y las diferencias estacionales en la disponibilidad de agua pueden dar lugar a la escasez temporal de alimentos. Las inundaciones y las sequías pueden causar algunas de las emergencias alimentarias más apremiantes (FAO, 2012).

El agua es fundamental para la seguridad alimentaria y la nutrición. Es vital en los ecosistemas, incluidos los bosques, lagos y humedales, de los que depende la seguridad alimentaria y la nutrición de las generaciones presentes y futuras. Es indispensable disponer de agua de calidad y en cantidad adecuadas, ya sea para beber como para el saneamiento, la producción alimentaria (pesca, cultivos y ganadería) y la elaboración, transformación y preparación de los alimentos. A nivel mundial, la agricultura de riego (de cultivos tanto alimentarios como no alimentarios) consume el 70% de las extracciones de agua, mientras que un 20% se destina a usos industriales —incluida la producción de energía— y un 10% a usos domésticos. La producción de alimentos, y concretamente el riego, es de lejos el sector en el que se utiliza la mayor parte del agua dulce extraída. En general, el agua sostiene el crecimiento económico y la generación de ingresos y, en consecuencia, el acceso económico a los alimentos (HLPE, 2015).

El agua potable y el saneamiento son fundamentales para la nutrición y la salud. La falta de acceso a agua potable, servicios de saneamiento y prácticas de higiene menoscaba el estado nutricional de las personas a causa de la difusión de enfermedades transmitidas por el agua e infecciones intestinales crónicas. A pesar de los avances significativos en cuanto al acceso a agua potable y

saneamiento, en 2012, según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF), el 4% de la población urbana y el 18% de la población rural del mundo (el 47% entre la población rural del África subsahariana) aún no podía acceder a fuentes mejoradas de agua potable, mientras que el 25% de la población no disponía de servicios de saneamiento mejorados o compartidos (HLPE, 2015).

El agua además de ser un requisito fundamental para sostener los medios de subsistencia y combatir el hambre y la pobreza en muchas partes del mundo desempeña otro papel, a saber, la de las actividades agrícolas. Una fracción importante de la población mundial se dedica a pequeñas empresas agrícolas de subsistencia que dependen totalmente del agua para obtener beneficios económicos y, a menudo, por su mera supervivencia. Las cantidades de agua requeridas en los sistemas de producción agrícola (cultivo, ganado, pesca) son, sin embargo, muchas veces superiores a los 20 litros que se sugieren como mínimo para beber e higiene. Debido a las crecientes demandas globales, el aumento de la infraestructura hídrica y la desviación del agua de fuentes naturales, a menudo favoreciendo el segmento más saludable de la sociedad en los países en desarrollo, garantiza un acceso y derechos apropiados al agua para estas actividades para las personas marginadas.

Se estima que el 70-90% de los suministros de agua dulce desarrollados en los países en desarrollo son retirados para producir alimentos. Por cierto, el 75% de los 1.200 millones de personas pobres del mundo dependen de la agricultura como fuente principal de ingresos (Villholth, 2009).

Asegurar los suministros de alimentos, mantener la seguridad alimentaria y evitar el hambre endémica o el hambre causada por desastres naturales o inundaciones y sequías recurrentes, siguen siendo una prioridad en muchos países en desarrollo donde el aumento de la población tiende a aumentar demasiado la producción de alimentos y la productividad. Ya que los agricultores que se defendían por sí mismos en virtud del acceso simple y directo a los recursos naturales, como ya había sido parte de la estrategia en el pasado, ya

no es posible a medida que la base de recursos naturales se está reduciendo de forma gradual y segura y los agricultores pobres ya no pueden ser colocados o trasladados a un exceso de áreas naturales en las afueras o fronteras de la civilización.

Existe un requisito claro y pendiente para mantener el stock y compartir de manera igualitaria y consistente la cantidad de recursos naturales limitados disponibles, incluido el agua. Sin embargo, en la mayoría de los casos, la agricultura a pequeña escala no sólo sirve para sostener a los beneficiarios directos, sino también a las economías locales más o menos prósperas y las cadenas de suministro de alimentos que ayudan a las comunidades a persistir. Por lo tanto, asegurar que los agricultores pobres de todo el mundo reciban una parte justa de la producción de agua, junto con los recursos adecuados de la tierra, para sus actividades agrícolas es vital para su sustento y mera supervivencia y debe ser una obligación moral junto con los derechos de agua potable proclamados (Villholth, 2009).

La importancia que tiene el agua radica en que las características que posee (Van der Zaag & Savenije, 2006):

- El agua es esencial. Sin agua no hay vida, ni producción económica, ni ambiente. No hay actividad humana que no depende de agua. Es un recurso vital. Lo mismo puede decirse de aire, tierra, combustibles y alimentos.
- El agua es insustituible. No hay sustitutos para el agua. La única excepción es las ciudades costeras que podrían producir agua dulce a partir del agua de mar a través de la desalinización.
- El agua es finita. La cantidad de agua disponible está limitada por la cantidad de agua que circula a través de la atmósfera anualmente.
- El agua es fugaz El agua fluye por gravedad. Si no la almacenamos se va. La disponibilidad del agua varía con el tiempo y también lo hace la demanda de agua. Existen reservas de agua: los acuíferos subterráneos

y lagos naturales. Pero estos lagos y acuíferos sólo se pueden utilizar de manera sostenible si se reponen por el flujo.

- El agua es un sistema. El ciclo anual de agua de lluvia para el escurrimiento es un sistema complejo en el que varios procesos (infiltración, escorrentía superficial, recarga, filtración, re-infiltración, reciclaje de humedad) están interconectados y son interdependientes con un solo sentido de flujo: río abajo.
- El agua es voluminosa. Aunque el agua es esencial para casi cualquier actividad económica, no hay muchos ejemplos de agua que serán transportadas en cualquier distancia considerable, sobre todo no en contra de la fuerza de la gravedad. Donde, sin embargo, se producen estas transferencias, que se refieren a agua destinada a usos de alto valor (para los sectores doméstico e industrial) y, en algunos casos excepcionales, para fines agrícolas altamente subvencionados.

En lugares secos, el crecimiento económico y demográfico crean situaciones donde el agua es escasa económicamente. En estos lugares, las instituciones del agua, leyes, proyectos, políticas y programas están diseñados para proporcionar el máximo beneficio derivado del uso de agua escasa. No sólo es el agua en sí escasa, sino el dinero, mano de obra y otros recursos necesarios para desarrollar, distribuir, transportar y purificar el agua también son escasos. Los diferentes sectores demandantes que compiten por el dinero y otros recursos, la dificultad económica y política de aumentar los impuestos para pagar por los programas de agua limitan los recursos disponibles para los programas de agua (Ward & Michelsen, 2002).

La valoración del agua en función de los costes que induce su disponibilidad debería ser, un punto de partida. Amortización de infraestructuras, junto a costes de mantenimiento y gestión de los sistemas de regulación, transporte y distribución serían, en ese sentido, la base del valor económico de los suministros urbanos, industriales y agrícolas. El precio-económico de un bien no depende sólo de los costes que exige su disponibilidad, sino también de su utilidad y

escasez. En el caso del agua, la utilidad implica, cada vez de forma más relevante, considerar la calidad del recurso, pues tanto la productividad en sus diversos usos (agrarios, industriales, domésticos y sanitarios), dependen en gran medida de sus características físico-químicas (Arrojo, 1999).

3.4 Precio económico del agua en la agricultura

El precio económico del agua proviene de los usos para los cuales el agua puede satisfacer las necesidades de las personas. El agua puede tener precio económico debido a que es un recurso escaso y también a que es capaz de ser aplicada a diferentes usos. Sin embargo, en qué medida el precio pagado por el agua representa con exactitud el beneficio que se deriva de su uso. Como un bien de consumo en los hogares, el agua se necesita en primer lugar para beber, después para cocinas, aseo y baño, para la limpieza de las cosas como ropa y platos, para el lavado de coches y entradas de vehículos y, por último, para riego. (Ward & Michelsen, 2002).

La forma en que el mercado le imputa un precio al agua es a través de tarifas; es decir, un rango de precios que deben de pagar los usuarios como contraprestación por determinado uso, rango de consumo o descarga, en función del tipo de usuario, zona socioeconómica o cualquier otro factor que apruebe la autoridad competente.

Las normas para establecer los precios del agua de riego varían considerablemente, dentro y entre países. La única característica sistemática de estos precios es que por lo general están muy por debajo del costo de suministrar el agua. Las tarifas del agua de riego son generalmente muy inferiores a las del agua urbana, que ya no cubren sus costos; la mayoría de los gobiernos ni siquiera han aceptado el principio de recuperar los costos del riego a través de sus tarifas.

El propósito de los esquemas de precios del riego debe ser el de asegurar que la distribución del agua en los sistemas de riego (o las comunidades con riego) resulte óptima a los efectos de que dichos sistemas funcionen eficientemente

como "dominio de acceso compartido a un recurso escaso"; los precios del agua deben considerarse como parte de un régimen en el cual los agricultores son inducidos a contribuir a un bien público —mejor gestión del agua— que los beneficia a todos ellos. El principio de reciprocidad requiere que todos contribuyan a los bienes públicos exactamente con la cantidad que ellos preferirían que lo hiciera cada uno de los miembros del grupo (FAO, 2004a).

Una limitante principal para aumentar los precios del agua es el inadecuado funcionamiento de los sistemas de riego. Los agricultores estarían dispuestos a pagar más siempre que el servicio sea confiable. Esta es una gran limitante, a menudo no satisfecha por los sistemas de riego por gravedad.

Los agricultores se distinguen por su renuencia a pagar tarifas por el agua de los sistemas públicos de riego. Sin embargo, es interesante notar que los mismos agricultores estarían dispuestos a invertir cantidades considerables (por unidad de volumen de agua) para abastecerse de agua subterránea. La conclusión obvia es que están dispuestos a pagar por el agua si esta es confiable y algo flexible (FAO, 2004a).

El precio del agua de riego no juega el papel normal de equilibrar la oferta con la demanda, excepto cuando existen mercados de derechos de aguas, todavía poco difundidos. Por consiguiente, en la mayoría de los casos la justificación del nivel de este precio debe ser diferente al de su papel de equilibrar ofertas y demandas. Existen cinco razones para que el precio del agua de riego tenga niveles adecuados, o sea, por lo general más elevados. Las tres primeras reflejan el interés de la sociedad frente a un recurso escaso y, los últimos dos, los intereses fiscales (*ibid.*):

1. Estimular la conservación del agua.
2. Fomentar la asignación del agua a sus usos más eficientes, es decir, a los usos agrícolas de valor más elevado, o a los no agrícolas si el agua es más productiva en términos netos (luego de descontar los costos de conducción), siempre que exista la infraestructura necesaria para

llevarla a los nuevos usuarios. Este tipo de asignación maximizaría la contribución al crecimiento económico de un recurso escaso; sin embargo, no es fácil que exista esa infraestructura intersectorial en las zonas de riego de los países en desarrollo.

3. Reducir al máximo los problemas ambientales asociados al riego, especialmente los derivados del excesivo uso de agua.
4. Generar suficientes ingresos para cubrir los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de manera que, entre otras cosas, no sea necesario invertir en costosos proyectos de rehabilitación.
5. Recuperar los costos de la inversión original en cada sistema, además de proporcionar ingresos por costos de operación y mantenimiento.

El propósito de los esquemas de precios del riego debe ser el de asegurar que la distribución del agua en los sistemas de riego (o las comunidades de regantes) resulte óptima a los efectos de que dichos sistemas funcionen eficientemente como "dominio de acceso compartido a un recurso escaso".... los precios del agua deben considerarse como parte de un régimen en el cual los agricultores son inducidos a contribuir a un bien público - mejor gestión del agua - que los beneficia a todos ellos. El principio de reciprocidad requiere que todos contribuyan a los bienes públicos exactamente con la cantidad que ellos preferirían que lo hiciera cada uno de los miembros del grupo (*ibid.*).

Los tres primeros objetivos indicados arriba están asociados a la política de precios para administrar la demanda, y los últimos dos se refieren a la política de precios para recuperar costos (FAO, 2004a).

Las tarifas del agua que tienen como objetivo recuperar los costos incurridos por el prestador de servicios, son fijadas de diversa manera en cada municipio, dependiendo de su marco jurídico. En algunos casos las aprueba el Congreso Estatal, en otras el Órgano de Gobierno o Consejo Directivo del organismo operador municipal, o la Comisión Estatal de Aguas. Generalmente existen tarifas específicas para cada tipo de usuario: doméstico, industrial, comercial, y servicios, entre otros. Habitualmente a mayor consumo, mayor precio por metro

cúbico (CONAGUA, 2011)

El objetivo principal de la tarificación del agua sigue siendo la recuperación de los costos. Existen políticas que pueden optar por subsidios cruzados (por razones de equidad) o los precios del agua subvencionados (por ejemplo, para el agua de riego justificada por los efectos multiplicadores del sector).

En los centros urbanos existe un mercado del agua muy peculiar. El agua tiene un precio volumétricamente y muchos pueden acceder a la demanda del recurso y los consumidores a decidir por sí mismos la cantidad a comprar del producto.

Sin embargo, dos aspectos importantes distorsionan el funcionamiento del mercado: el proveedor de agua siempre es un monopolista; y en esos centros urbanos aplicando un arancel bloques crecientes, los usos más esenciales (y por lo tanto más valorados) tienen un precio más bajo (primer bloque), mientras que otros usos menos esenciales tienen un precio más alto (bloques posteriores) (Van der Zaag & Savenije, 2006).

En México, la Ley general de aguas (artículo 81), establece: “La participación de los sectores social y privado en la prestación de los servicios públicos, podrá incidir en sus diversos elementos, tales como extracción, captación, conducción, potabilización, distribución, suministro, tratamiento, recolección, disposición, desalojo, medición, determinación, facturación y cobro de tarifas. En todo caso el prestador de esos servicios será responsable de su actividad en los términos que disponga la ley” (Cámara de Diputados, 2015). Con la privatización del agua, la distorsión del mercado del agua será cada vez más notoria. Se fracturará más el funcionamiento del mercado del agua, lo que podrá ocasionar variación en los precios y no necesariamente por la baja disponibilidad del agua.

Es importante señalar que los precios que la mayoría de los usuarios pagan por el agua reflejan, en el mejor de los casos, su costo de suministro físico y no su valor de escasez. Los usuarios pagan por el capital y los costos operativos de la infraestructura de suministro de agua, pero, en muchos países, no se cobra por

el agua en sí. El agua es propiedad del estado y el derecho de uso se otorga de forma gratuita. Por lo tanto, el agua se trata de manera diferente al petróleo, carbón u otros minerales para los cuales el gobierno exige el pago de una regalía para extraer el recurso. Se ha observado durante mucho tiempo que los precios cobrados a los agricultores son mucho más bajos que los cobrados a los residentes urbanos, a menudo por un factor de 20 o más. A menudo se asume que esto se debe a que el agua del riego ha sido subsidiada por el gobierno federal, pero esta no es la razón principal (Hanemann, 2006).

La razón es la gran diferencia en el costo real del suministro de agua agrícola frente al urbano. A diferencia del agua urbana, el agua de riego no se trata, y generalmente no está disponible bajo demanda a través de un sistema de distribución presurizado. Además, el capital físico utilizado para el suministro de riego es a menudo antiguo y de larga duración, y puede que haya sido pagado hace mucho tiempo (*ibid.*).

El costo de oportunidad del agua se define como el valor de los beneficios desplazados por una acción de política que desvía recursos de otras actividades económicas productivas y trae esos recursos para respaldar esa acción. Para cualquier cantidad potencial que podría suministrarse, la demanda es limitada. Así que el costo de oportunidad de una unidad adicional de agua ofrecida disminuye a mayor cantidad de usuarios del agua (Ward & Michelsen, 2002)

El precio económico del agua se calcula como el valor del producto marginal del agua de la calibración del programa de maximización de la ganancia.

3.4.1 Producto marginal del agua.

El producto-total de un suministro de agua dado se mide por la total disposición a pagar por un determinado nivel de agua utilizada.

El costo de oportunidad o producto marginal refleja los beneficios de aplicar una unidad adicional de agua a un determinado cultivo y se estima como la diferencia entre una ganancia adicional en los ingresos brutos a través del aumento del

rendimiento y el costo adicional de la aplicación de la unidad marginal de agua a la cosecha. Los costos adicionales pueden incluir una variedad de insumos agrícolas, tales como fertilizantes, químicos y energía para la aplicación de agua, entre otros. Este costo adicional se llama típicamente el costo marginal (MC) del agua. La diferencia entre un cambio en el ingreso bruto asociado con una determinada cantidad de agua y un cambio en el costo marginal resulta en el producto marginal del agua en un determinado cultivo (uso) en un lugar dado (subcuenca). El producto marginal del agua está relacionado con un cambio en el valor total de un producto (medido a través de los ingresos brutos) asociado con varios niveles de aplicación de agua (Samarawickrema & Kulshreshtha, 2009).

El producto marginal del agua representa la contribución de una unidad adicional de agua para su objetivo, público o privado. Proporciona información importante para el análisis de políticas de desarrollo del agua o asignación. Para el caso de desarrollo, las decisiones que tratan del incremento de la oferta del agua, la eficiencia económica requiere que el desarrollo del agua se incremente siempre y cuando el producto marginal de la capacidad añadida excede su costo marginal. Es decir, si el valor marginal de la ampliación de la capacidad de un sistema de agua es mayor que su costo marginal, entonces es una buena economía para ampliar el sistema. Para la decisión de asignación de los recursos escasos de agua entre usos competitivos, la eficiencia económica se produce sólo cuando el valor marginal por unidad de agua es igual para todos los usos. Es decir, las políticas mejoran la eficiencia económica cuando reasignan agua entre los usuarios si el producto marginal obtenida por el ganador supera el valor marginal perdida por el perdedor (Ward & Michelsen, 2002).

El producto marginal del agua en la agricultura se puede utilizar para evaluar los cambios en las políticas que puedan alterar el suministro de agua de la zona de producción actual o los patrones de uso del agua. Esto permite a los analistas de políticas de mirar hacia adelante y examinar los efectos de futuras propuestas políticas. El producto marginal es la cantidad añadida de que se produciría si una hectárea adicional por año se suministrara (*ibíd.*).

3.4.2 Producto promedio del agua.

El producto promedio de agua es el valor total dividido por la cantidad de agua suministrada. El producto promedio del agua es típicamente de menor interés de política para la asignación de agua que el valor marginal o total, pero su concepto y fácil simplicidad de cálculo puede enganchar al analista de políticas en el uso que se aproximan al producto marginal. El producto medio suele ser mayor que el producto marginal (Ward & Michelsen, 2002).

3.5 Técnicas de estimación del precio económico del agua

La valoración económica se ocupa de la valoración en términos monetarios de los elementos que son de interés de las personas. La valoración económica *non-market* aplica la misma noción a los artículos que no se venden en un mercado. Esto se debe a que, incluso para algo que no se vende en un mercado, aún tiene sentido conceptualizar la medida económica de la satisfacción del artículo como el monto monetario que la persona estaría dispuesta a cambiar por el artículo si fuera posible. para hacer tal intercambio. En efecto, esto genera una medida monetaria del cambio en el bienestar de la persona al utilizar el cambio en el ingreso monetario de la persona que consideraría equivalente al artículo en cuestión en términos del impacto general en su satisfacción (Hanemann, 2006).

Existen diversas técnicas de estimación del precio económico del agua, unas incluyen la estimación de las curvas de demanda y el área bajo ellas, el análisis de las transacciones del mercado, el uso de métodos de producción considera la contribución del agua para el proceso de producción, la estimación de los costos de proveer agua, así como otras técnicas utilizadas para estimar los recursos ambientales en general. Las técnicas que se enfocan en el estudio de la valoración económica del agua se dividen en dos enfoques: directo e indirecto. En el enfoque directo se utilizan métodos de encuesta para obtener información valoración directamente de los hogares mientras que el enfoque indirecto se basa en el comportamiento del mercado observada para inferir el valor de las funciones de recursos hídricos (FAO, 2004a).

3.5.1 Enfoque indirecto.

El enfoque indirecto se basa en el comportamiento del mercado observada para producir mercancías. Se incluyen: observaciones sobre la base de las transacciones de mercado, las funciones de demanda derivados, el método del coste de viaje, el método de precios hedónicos, métodos de imputación residuales, métodos de ahorro de costos / costo de reposición, el enfoque multiplicador de la renta, y la técnica de dosis-respuesta (FAO, 2004b).

Las observaciones de las transacciones basadas en el mercado en el agua.

El precio económico de los bienes y servicios comercializados es indicado por el mercado, ajustado por cualquier distorsión. Los precios de mercado son ajustados para permitir ningún subsidio, los impuestos y las distorsiones del comercio, la conversión a "precios sombra" que reflejan el verdadero precio económico de la sociedad (*ibid.*).

Las observaciones de las transacciones de derechos de agua ofrecen un potencial para proporcionar medios relativamente simples de la determinación del precio económico.

Funciones derivadas de la demanda.

Se pueden emplear una función inversa de demanda de la empresa o de los hogares para estimar la disposición del usuario a pagar por el agua.

A pesar del carácter monopolístico de la oferta habitual, ya que el comprador puede comprar todo lo que desee en la lista de precios, es posible derivar inferencias sobre la disposición a pagar y la demanda, siempre y observaciones suficientes se ven a través de variaciones en el precio real.

Los datos se obtienen preferiblemente a partir de observaciones sobre el comportamiento del uso del agua de los hogares individuales. Como esto puede ser costoso, se utiliza a menudo los datos agregados de los proveedores. Se emplea el análisis de regresión estadística para estimar los parámetros de la

ecuación de la demanda (FAO, 2004b).

Método del coste del viaje.

El método del costo del viaje se emplea para valorar recursos naturales, como lagos y ríos que son centros de recreación, ya que no existe precio para ellos, por lo que a partir de las funciones de demanda pueden ser estimados.

El enfoque del costo de viaje se centra en los gastos de viaje que incurren los individuos en visitas realizadas a sitios de recreación. Los gastos de viaje (los costos de transporte más el valor de tiempo) se utilizan como precios implícitos a valorar el servicio prestado y los cambios en su calidad. Los gastos de viaje miden sólo el valor de uso de los sitios y por lo general se limitan a valores de uso recreativo; el valor de opción y existencia de los sitios se miden utilizando otras técnicas (FAO,2004b).

Existen dos variantes del modelo del costo de viaje:

1. El primero puede ser utilizado para estimar funciones de demanda recreativa (representativos) de los individuos. Se observó la tasa de visitas de personas que hacen viajes a un sitio de recreación, en función de los gastos de viaje. El valor del lugar de recreo a la persona se mide desde el área bajo la curva de demanda del individuo: el valor total de recreación (uso) de un sitio es el área bajo cada curva de demanda agregado para todas las personas. Este modelo de costos de viaje "individuo" requiere que haya variación en el número de viajes que los individuos hacen al sitio de recreo con el fin de estimar sus funciones de demanda.
2. La segunda variante, conocida como el modelo de costo de viaje "de zona", estima la demanda agregada o mercado de un sitio usando técnicas estadísticas estándar. La unidad de observación es la "zona" en lugar de la persona. Las zonas se especifican como áreas con los gastos de viaje similares; la región que rodea a un sitio se divide en zonas de aumento de costo de viaje. El método se basa en la observación del número de visitas

al sitio recreacional per cápita de la población de cada zona. Los datos se recogen de nuevo a través de una encuesta a los visitantes del sitio (FAO,2004b).

Para ambas variantes, la curva de demanda es estimada por la regresión de la tasa de visita frente a factores socioeconómicos (como los ingresos), el costo de los viajes de visitar el sitio y algún indicador de la calidad del sitio. Por lo tanto, los requisitos de datos son considerables. Para el modelo individual, se requiere datos sobre las características socio-económicas de cada individuo. En el caso del modelo de zona, se requieren estos datos para la población de cada zona. También se requieren datos sobre la naturaleza de cada viaje al sitio, la distancia recorrida, el tiempo empleado y el costo de los viajes. Los datos se obtienen por lo general a partir de encuestas existentes o encargados especialmente. El método también requiere una medida de la calidad del sitio, que puede ser una variable intangible(*ibid.*).

Precios hedónicos.

El método de precios hedónicos emplea las diferencias en los precios de los bienes comercializados para derivar el valor de las características ambientales. Los productos comercializados pueden ser vistos con un conjunto de características; para algunos bienes, éstos incluyen características ambientales. Los precios diferenciales que las personas pagan por dichos bienes pueden reflejar sus preferencias para la calidad ambiental (FAO, 2004b).

Este modelo desglosa el precio de un bien privado, de mercado, en función de varias características. Estas características tienen un precio implícito cuya suma determina, en una proporción estimable, el precio del bien de mercado que se observa. Así, el precio de una vivienda puede determinarse por la agregación de los precios implícitos de sus características y de las del entorno en el que está ubicada. Por procedimientos econométricos se calcula el peso de las variables que determinan el precio final de la vivienda y, bajo determinados supuestos, se estiman los precios de dichas características (Riera,1994)

Se emplea el análisis estadístico de los precios y las características de los bienes para derivar un valor implícito de la calidad ambiental. La fijación de precios hedónicos se basa en una serie de supuestos estrictos. Supone un mercado libre y eficiente libremente, y que los individuos tienen información completa y la movilidad. El mercado puede ser segmentado, dando lugar a restricciones en la movilidad entre áreas. Los individuos pueden no estar plenamente informados sobre las características ambientales de propiedades antes de la compra. El mercado no puede estar en equilibrio, lo que resulta en precios implícitos que representan las estimaciones de límite superior o inferior del precio real (FAO,2004b).

Una suposición adicional es que la medida utilizada para la característica del medio ambiente en percepciones hedónicas refleja la fijación de precios de los individuos. Aunque se requiere una medida cuantitativa objetiva para el análisis, puede ser que la gente percibe la característica ambiental cualitativamente. Una medida más amplia de la calidad ambiental puede ser necesaria si los individuos no discernen los cambios en una variable individual. Una complicación adicional surge en el análisis estadístico.

Si se produce una correlación entre las variables, una compensación tiene que ser hecha entre multicolinealidad y el sesgo debido a la omisión de variables explicativas significativas.

El método de los precios hedónicos tiene una base teórica sólida y es capaz de producir estimaciones válidas de beneficios, siempre y cuando las personas pueden percibir el cambio ambiental de interés. El método de los precios hedónicos se ha empleado para producir estimaciones fiables de los valores de los cambios ambientales reales, tales como la mejora del suministro de agua (*ibid.*).

Comportamiento preventivo y gastos defensivos.

Se centra en los costos incurridos en la mitigación de los efectos de la reducción

de la calidad del medio ambiente. Representa un valor mínimo para la función del medio ambiente (FAO,2004b)

La sustitución perfecta proporciona la base para la técnica de comportamiento preventivo y los gastos defensivos.

El enfoque requiere datos sobre el cambio en una característica del medio ambiente de interés y sus efectos de sustitución asociados. Se encuentran aproximaciones de mirar directamente a los cambios en el gasto en un bien sustituto que surgen como resultado de algún cambio ambiental. Alternativamente, ese puede determinar el valor por unidad de cambio de una característica del medio ambiente. Esto implica determinar la tasa marginal de sustitución entre la característica del medio ambiente y el bien sustituto, utilizando los datos de consumo técnicos conocidos u observados. La tasa marginal de sustitución es multiplicada por el precio del bien sustituto para dar el valor por unidad de cambio en las características del medio ambiente.

Cuando el comportamiento preventivo observado no es entre dos sustitutos perfectos, el valor de la característica ambiental está subestimado. Por ejemplo, si hay un aumento de la calidad del medio ambiente, el beneficio de este cambio viene dado por la reducción en el gasto en el bien de mercado sustituto necesario para mantener a la persona en su nivel original de bienestar.

Sin embargo, cuando el cambio en la calidad tiene lugar, el individuo no reduce el gasto (con el fin de mantenerse en el nivel original de bienestar). Los efectos ingreso causan reasignación de los gastos entre todos los bienes con una elasticidad ingreso de la demanda positiva. En consecuencia, la reducción del gasto en el sustituto de la calidad del medio ambiente no captura todos los beneficios del aumento de la calidad.

Otros problemas con el enfoque son que las personas pueden realizar más de una forma de comportamiento preventivo en respuesta a un cambio ambiental, pueden tener otros efectos benéficos que no se consideran de forma explícita

(por ejemplo, la compra de agua embotellada para evitar el riesgo de consumo de los suministros contaminados también puede proporcionar sabor añadido beneficios). Por lo tanto, los modelos de comportamiento preventivos simples pueden dar estimaciones incorrectas de valor donde no incorporan las alternativas técnicas y de comportamiento a las respuestas de los individuos a cambiar en la calidad ambiental. Sin embargo, aunque la técnica se ha utilizado pocas veces, es una fuente potencialmente importante de las estimaciones de valoración, ya que da estimaciones teóricamente correctas que son obtenidos de los gastos reales y que de este modo tener alta validez de criterio (FAO,2004b).

Enfoque de atribución residual y variantes.

El uso de agua en un proceso de producción se puede determinar utilizando el enfoque de atribución residual. Esta es una técnica de análisis de presupuesto que busca hallar la máxima rentabilidad atribuible al uso del agua mediante el cálculo de la rentabilidad total a la producción y restando todos los gastos no relacionados con el agua. El valor del producto se distribuye entre la gama de insumos comercializados que intervienen en su producción. El valor residual se supone que es igual a los rendimientos de agua y representa la cantidad máxima que el productor estaría dispuesto a pagar por el agua y aun así cubrir los costos de entrada (Naeser & Bennett, 1998 citado por FAO, 2004b). Si se restan sólo los costos de insumos variables, se deriva una medida a corto plazo del valor del agua. Si se restan los costos de todos los insumos de no relacionados con el agua (incluyendo una tasa normal de retorno sobre el capital), se obtiene un valor a largo plazo.

La validez del enfoque requiere: productores que maximicen ganancias empleen insumos productivos hasta el punto en que el producto marginal es igual al costo de oportunidad; y que el valor total del producto se puede dividir, por lo que cada ingreso se puede 'pagar' de acuerdo a su productividad marginal y el valor total del producto es por lo tanto agotado.

El enfoque a veces se clasifica como una técnica de presupuesto de cultivos

agrícolas en las aplicaciones a la agricultura. Una dificultad es que el rendimiento residual (después de restar los costos de todos los insumos medios no relacionados con el agua) es el retorno al agua, además de todas las entradas no medidas, y por lo tanto dará lugar a sobreestimación del valor del agua.

El enfoque también es muy sensible a pequeñas variaciones en supuestos sobre la naturaleza de la función de producción o los precios. Por lo tanto, es más adecuado para su uso en los casos en que la entrada residual contribuye significativamente a la salida. El cálculo de los valores residuales requiere considerable información y la precisión en la asignación de contribuciones entre la gama de insumos.

Las variantes del enfoque de imputación residual incluyen: comparación de rendimiento y modelos de optimización.

Comparación de rendimiento

En su aplicación a la agricultura de riego, el método de comparación de rendimiento de los valores del agua de riego como la diferencia en los rendimientos por ha entre tierras de riego y de temporal, utilizando los datos observados del presupuesto agrícola. Se supone que los rendimientos netos adicionales obtenidos por el uso del riego en el proceso de producción representan la cantidad máxima que el productor estaría dispuesto a pagar por el uso del agua de riego. Sin embargo, el enfoque supone homogeneidad en la tierra, los cultivos, la cría, la calidad de los productos y el precio entre la producción de riego y de gravedad. La heterogeneidad que se da en estos factores en realidad ponga en cuestión de la diferencia en los rendimientos netos como la disposición neta a pagar por el agua de riego.

Modelos de optimización.

Se utilizan modelos de optimización para proporcionar soluciones matemáticas a los problemas que conllevan la maximización o minimización de un sujeto económico objetivo a las limitaciones especificadas en el objetivo económico. En

la generación de la solución óptima, los modelos revelan el precio económico asociado de todas las entradas. Hay dos tipos de modelo de optimización: modelos de programación matemática y modelos de optimización dinámica (FAO,2004b).

Modelos de programación matemática.

Los modelos de programación matemática tienden a ser estáticos, de un solo período. Ellos modelan los problemas económicos en los que el agente económico (consumidor, planificador central, o empresa) busca optimizar (maximizar o minimizar) una sola función objetivo (por ejemplo, los excedentes, los costos, ingresos) durante un período de tiempo específico, mientras se enfrenta a restricciones. Los modelos se pueden determinar los valores marginales o no marginales para el uso del agua como un insumo. El agua entra en los modelos de programación matemática como una restricción de recursos, de manera que su producto marginal se encuentra al suavizar la restricción de agua mediante la adición de una unidad de agua disponible para la producción y el cálculo de la diferencia entre el valor óptimo antes y después de suavizar la restricción. Este producto marginal del agua es también conocido como el "precio sombra" de agua. Los cambios no marginales pueden ser evaluados de manera similar, también se pueden calcular los cambios en el valor sombra del agua, los cambios exógenos en los precios de producción, precios de entrada, o limitaciones. Modelos de programación matemática a menudo se utilizan para determinar el precio-del agua de riego y las aguas subterráneas en situaciones en las que están disponibles datos detallados en agentes representativos.

Modelos de optimización dinámicos

Los modelos de optimización dinámicos se utilizan para indicar los resultados óptimos para períodos separados en procesos que implican múltiples períodos de tiempo. De una manera similar a los modelos de programación matemática, pueden determinar los productos marginales y no marginales para el agua y los impactos de los cambios en otras variables sobre el precio del agua. Modelos de

optimización dinámicos se han utilizado para medir el precio del agua en los sistemas de adjudicación, evaluar las políticas de riego y proyectos de calidad del agua.

Métodos de ahorro de costos / costo de reposición.

El costo de reposición estima los beneficios de un activo ambiental basado en los costos de reposición o restauración. El bien reemplazado o restaurado se supone que es un sustituto directo para el original. La técnica se utiliza ampliamente debido a que los datos requeridos provienen de los gastos reales o del cálculo de los costos estimados. El supuesto subyacente es que los costos de reemplazo son iguales a los beneficios que la sociedad deriva del activo. Sin embargo, los beneficios derivados de los activos podrían superar sustancialmente los costos de renovación o rehabilitación, en cuyo caso la técnica subestima el valor del activo. (FAO, 2004b).

Se requiere trabajo para cumplir con las normas ambientales económicamente determinada. El uso del costo de reemplazo asume que el reemplazo o la restauración completa son factibles. También hay problemas temporales como el reemplazo o la restauración de un recurso alternativo de agua, por ejemplo, un humedal, puede no coincidir directamente con el daño o pérdida del recurso original.

El método se emplea comúnmente para valorar el uso de agua para el transporte, y también se puede aplicar a otros usos del agua. El método también se ha utilizado para valorar la generación de energía hidroeléctrica mediante la estimación de la diferencia entre el costo de la generación de energía hidroeléctrica y el método más barato alternativo de generación de energía (por ejemplo, carbón).

Funciones dosis-respuesta.

Las funciones dosis-respuesta se pueden establecer entre los cambios en las variables ambientales (la dosis) y el impacto resultante sobre bienes y servicios

comercializados (la respuesta). Cuando este es el caso, una función dosis-respuesta puede proporcionar la base para la valoración de la variable ambiental de interés; esta es la principal técnica utilizada para obtener los valores económicos de la contaminación del aire. La valoración se realiza multiplicando la función dosis-respuesta física por el precio o el valor por unidad de impacto para dar una función de daño monetaria. Este último es equivalente al cambio en el excedente del consumidor más el excedente del productor causado por el impacto (FAO,2004b).

Cuando el impacto previsto por la función dosis-respuesta es marginal, puede ser posible valorar el impacto usando los precios de mercado relevantes, ajustado para cualquier intervención del gobierno y las imperfecciones del mercado. Para los impactos más grandes, se requiere modelar, para predecir los cambios resultantes en los precios y el comportamiento en ambos lados de la oferta y la demanda de los mercados de referencia.

Puede ser posible grabar el impacto de cambio en la variable de entorno utilizando variables que son fáciles de observar y medir (por ejemplo, caída de las hojas y la decoloración de la vegetación). Sin embargo, algunos impactos (por ejemplo, la reducción del vigor de la planta y la reducción de resiliencia de plagas) se dificultan observar directamente. En tales casos, se puede utilizar como medida de impacto una "variable instrumental", que es fácilmente medible y proporciona un indicador del impacto de interés. Como una alternativa a los datos empíricos, funciones de dosis-respuesta

También puede ser especificado el uso de modelos de simulación convenientemente validados, como los modelos pesqueros, modelos de rendimiento de los cultivos, y los modelos de crecimiento biológico.

Las funciones de dosis-respuesta se recomiendan en casos en los que la relación entre el cambio en una variable ambiental y el impacto resultante sobre un bien o servicio se pueden establecer (no puede ser utilizado para estimar los valores de no-uso). Puede ser una técnica costosa para usar donde se requiere la

manipulación de grandes bases de datos para el modelado físico y económico. Sin embargo, cuando ya existen las funciones dosis-respuesta necesarias y los impactos son marginales, el método puede ser muy barato de usar con demandas bajas a tiempo, proporcionando razonables aproximaciones al verdadero valor económico.

3.5.2 Enfoque directo.

Las técnicas de valoración directa buscan obtener preferencias directamente a través del cuestionamiento de los individuos en su disposición a pagar por un bien o un servicio. Estas técnicas incluyen el método de valoración contingente, clasificación contingente y análisis conjunto (FAO,2004b).

Método de valoración contingente.

El método de valoración contingente puede ser útil para buscar el valor de varios aspectos de los recursos hídricos, incluyendo la calidad del agua, la recreación y la biodiversidad. Puede ser empleado para calcular ambos valores de uso y no de uso, incluyendo los valores de opción y existencia (FAO,2004b).

El método de la valoración contingente es una de las técnicas que se emplean para estimar el valor de bienes (productos o servicios) para los que no existe mercado. Se trata de simular un mercado mediante encuesta a los consumidores potenciales. Se les pregunta por la máxima cantidad de dinero que pagarían por el bien si tuvieran que compararlo, como hacen con los demás bienes. Los cuestionarios juegan el papel de un mercado hipotético, donde la oferta viene representada por la persona entrevistadora y la demanda por la entrevistada (Riera,1994).

Uno de los problemas con el método de valoración contingente es que está sujeto a sesgos. La probabilidad de la ocurrencia de la conducta estratégica depende de la obligación de pago percibida de los encuestados y sus expectativas acerca de la provisión del bien. Cuando las personas creen que en realidad tienen que pagar su voluntad informado a pagar, pero que su valoración personal no afecta

si la mercancía se proporciona o no, hay una tentación de subestimar el valor real con la esperanza de que otros pagarán. El método de valoración contingente es probable que sea más fiable para la valoración de beneficios ambientales, en particular cuando se consideran los bienes familiares, tales como servicios de ocio locales (FAO, 2004b).

Clasificación contingente y análisis conjunto.

La clasificación contingente se implementa en la misma línea que la valoración contingente, salvo que el demandado tiene que clasificar para un gran número de alternativas que comprenden diversas combinaciones de bienes ambientales y precios. Se utiliza un marco de utilidad aleatoria para analizar los datos sobre la clasificación completa de todas las alternativas. La estimación estadística se realiza a menudo utilizando esencialmente un modelo logit multinomial del orden de clasificación del nivel de utilidad aleatoria asociada a cada alternativa. Los precios implícitos de los atributos o medidas de cambio de bienestar se calculan a partir de las estimaciones de los parámetros del modelo logit (FAO,2004b).

El análisis conjunto se relaciona estrechamente con la clasificación de los contingentes. Las personas que participan en un análisis conjunto experimento para llevar a cabo un gran número de tareas de clasificación. Cada tarea de clasificación consiste en un pequeño número de opciones alternativas. Sobre la base de los datos recogidos, un tipo de modelo de índice de utilidad se calcula para cada individuo. Por lo tanto, se diferencia de la valoración contingente y la clasificación.

Análisis objetivo.

Este método se ha empleado en la valoración de las diversas funciones de los recursos hídricos, centrándose tanto en el uso de técnicas simples o múltiples de valoración (FAO,2004b).

Se ha producido un aumento en el uso de meta-análisis, ocasionado por:

- El aumento en el número de estudios de valoración ambiental que están disponibles;
- Grandes diferencias en los resultados de valoración causados por diferencias en los diseños de investigación (Carson et al., 1996 citado por FAO,2004b)
- Los altos costos de los estudios de la evaluación original

Se puede utilizar para identificar los criterios para la transferencia del medio ambiente válidos. Se identifican en meta-análisis como factores que explican significativamente las variaciones en los resultados de valoración. Meta-análisis también se puede utilizar para evaluar la validez convergente de las estimaciones de valor. La validez convergente se puede probar mediante el fraccionamiento de un conjunto de datos en dos. La mitad del conjunto de datos se utiliza para identificar los factores significativos. La otra mitad se utiliza para comprobar si las estimaciones de valor en base a los factores significativos caen dentro del intervalo de confianza de las estimaciones en la otra mitad del conjunto de datos

Método multiplicador de ingresos

El método de multiplicadores de ingresos mide la circulación de los gastos a través de una economía aislada, trazando el flujo de dinero a través de los distintos sectores de la economía. El efecto de los gastos en un sector en el conjunto de la economía se mide al multiplicar los multiplicadores de ingresos por los gastos. Representan la redistribución de la actividad económica: las transferencias de excedentes entre las regiones, entre las personas y entre las industrias. Esta suma a cero en las economías con pleno empleo. Por lo tanto, los cambios en los gastos proporcionan alguna evidencia de que una actividad o equipamiento para los que se realizan los gastos es de valor, pero no proporcionan orientación sobre la magnitud de este valor (FAO, 2004b).

4. MÉTODOLÓGÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

En este capítulo se describen el método de programación lineal y el econométrico que serán empleados para el cálculo del precio sombra del agua para riego. Además, se señalan las fuentes de información utilizadas para la elaboración de los modelos empleados, que se describen en el capítulo 6.

4.1 Programación lineal.

La programación lineal estudia la optimización de una función lineal que satisface un conjunto de restricciones lineales de igualdad o desigualdad. El problema de programación lineal fue concebido por primera vez por Kantorovich y después por George B. Dantzig alrededor de 1947. La programación lineal es una técnica que se utiliza para la solución de problemas en los que se desea maximizar o minimizar una función lineal de una o más variables, llamada función objetivo, sujeta a ciertas limitaciones o restricciones, que se pueden representar como desigualdades o igualdades de funciones lineales de las variables (Bueno, 1987). Un programa lineal es aquel en que el modelo matemático o descripción de un problema determinado puede ser establecido usando relaciones lineales (Mena, 1980).

En muchas situaciones de negocios, los recursos son limitados y la demanda de los mismos es grande. La programación lineal es útil para asignar los recursos escasos entre las distintas demandas que compiten por ellos. Los recursos pueden ser tiempo, dinero o materiales, y las limitaciones se conocen como restricciones. La programación lineal es útil para encontrar la mejor para la asignación de los recursos y proporciona información sobre el precio sombra de recursos los recursos disponibles (Krajewski, *et al.*, 2008).

La programación lineal (PL) se refiere a varias técnicas matemáticas utilizadas para asignar en forma óptima los recursos limitados a distintas demandas que compiten por ellos, es el más popular de los enfoques con el título general de técnicas matemáticas para la optimización y se ha aplicado a muchos problemas

de la administración de operaciones. Algunas aplicaciones típicas son:

- ☐ Planeación de operaciones y ventas agregadas: encontrar el programa de producción que tenga el costo mínimo.
- ☐ Análisis de la productividad en la producción/servicios: considerar el grado de eficiencia con el cual los establecimientos de servicios y de manufactura están utilizando sus recursos en comparación con la unidad que tiene mejor desempeño.
- ☐ Planeación de los productos: encontrar la mezcla óptima de productos, considerando que varios productos requieren diferentes recursos y tienen distintos costos.
- ☐ Rutas de los productos: encontrar el camino óptimo para fabricar un producto que debe ser procesado en secuencia, pasando por varios centros de maquinado, donde cada máquina del centro tiene sus propios costos y características de producción.
- ☐ Programación de vehículos/cuadrillas: encontrar la ruta óptima para utilizar recursos como aviones, autobuses o camiones y las cuadrillas que los tripulan para ofrecer servicios de transporte a clientes y llevar los materiales que se transportarán entre diferentes plazas.
- ☐ Control de procesos: minimizar el volumen de desperdicio de material generado cuando se corta acero, cuero o tela de un rollo o de una lámina de material.
- ☐ Control de inventarios: encontrar la combinación óptima de productos que se tendrán en existencia dentro de una red de almacenes o centros de almacenamiento.
- ☐ Programación de la distribución: encontrar el programa óptimo de embarques para distribuir los productos entre fábricas y almacenes o entre almacenes y detallistas.
- ☐ Estudios para ubicar la planta: encontrar la ubicación óptima para una nueva planta evaluando los costos de embarque entre plazas alternativas y las fuentes de suministro y de demanda.

- Manejo de materiales: encontrar las rutas que impliquen el costo mínimo para el manejo de materiales y máquinas (como grúas) entre los departamentos de una planta o transportar materiales de un patio de almacén a los lugares de trabajo, por ejemplo, por medio de camiones (Chase *et al*, 2009).

En los últimos años, la programación lineal se ha aplicado extensamente a problemas militares, industriales, financieros, de comercialización, de contabilidad y agrícolas.

Todos los problemas de programación lineal comparten cuatro propiedades:

- Todos los problemas buscan maximizar o minimizar alguna cantidad, por lo general la utilidad o el costo. Se hace referencia a esta propiedad como la función objetivo de un problema de programación lineal.
- La presencia de limitaciones o restricciones que acotan el grado al cual se puede alcanzar un objetivo.
- Deben existir cursos de acción alternativos entre los cuales se pueda elegir.
- Los objetivos y restricciones en los problemas de programación lineal se deben expresar en términos de ecuaciones o desigualdades lineales (Render *et al.*, 2006).

Características de la programación lineal

La programación lineal se puede usar para resolver problemas que tengan las siguientes características: dos o más variables cuantitativas de decisión, función objetivo lineal; cada variable de decisión debe de tener asociada una medida por unidad de la “bondad” de esa variable en particular, y restricciones lineales. En virtualmente todo problema de decisión hay restricciones sobre cómo debe el administrador manipular las variables de decisión (Schneider & Byers, 1982).

Supuestos de la programación lineal.

Proporcionalidad.

Es un supuesto acerca de las actividades individuales, consideradas independientemente de las otras. Por lo tanto, considérese el caso en el que sólo se emprende una de las n actividades. Llamémosla la actividad k , de modo que $x_j = 0$ para todo $j = 1, 2, \dots, n$, excepto $j = k$. El supuesto es que, en este caso: 1) la medida de efectividad Z es igual a $c_k x_k$; 2) el uso de cada recurso i es igual a $a_{ik} x_k$; es decir, las dos cantidades son directamente proporcionales al nivel de cada actividad k conducida por sí misma ($k = 1, 2, \dots, n$). Esto implica en particular que no se tiene carga extra de arranque con el inicio de la actividad y que se cumple la proporcionalidad sobre el intervalo completo de niveles de la actividad.

Aditividad.

El supuesto de proporcionalidad no es suficiente para garantizar que la función objetivo y las funciones de restricción sean lineales. Surgirán términos de productos cruzados si se tienen interacciones entre algunas de las actividades que cambiarían la medida total de la efectividad o el uso total de algún recurso. La aditividad supone que no existen tales interacciones entre las actividades. Por lo tanto, el supuesto de aditividad requiere que, dados los niveles cualesquiera de actividad $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, el uso total de cada recurso y la medida total resultante de la efectividad es igual a la suma de las cantidades correspondientes generadas por cada actividad conducida por sí misma.

Divisibilidad.

A veces las variables de decisión tendrían significado físico únicamente si tienen valores enteros. Sin embargo, con frecuencia la solución obtenida por medio de la programación lineal no es entera. Por lo tanto, la suposición de divisibilidad es que las unidades de actividad pueden dividirse en niveles fraccionarios cualesquiera, de modo que pueden permitirse valores no enteros para las variables de decisión.

Certeza.

El supuesto de certeza es que todos los parámetros del modelo (los valores a_{ij} , b_i y c_j) son constantes conocidas. En problemas reales, esta suposición rara vez se satisface con precisión. Por lo común, los modelos de programación lineal se formulan para seleccionar algún curso de acción futuro. En consecuencia, los parámetros usados se basarían en una predicción de condiciones futuras, lo cual inevitablemente introduce cierto grado de incertidumbre (Hilier & Lieberman, 1982).

La formulación de un programa lineal implica desarrollar un modelo matemático para representar al problema administrativo. En consecuencia, para formular un problema lineal, es necesario entender el problema que se enfrenta. Los pasos para formular un programa lineal son los siguientes:

- ☐ Entender por completo el problema administrativo que se enfrenta.
- ☐ Identificar los objetivos y las restricciones
- ☐ Definir las variables de restricción
- ☐ Utilizar las variables de decisión para escribir las expresiones matemáticas de la función objetivo y de las restricciones (Render *et al.*, 2006)

La programación lineal utiliza un modelo matemático para describir el problema. El adjetivo lineal significa que todas las funciones matemáticas del modelo son funciones lineales. En este caso, la palabra programación no se refiere aquí a términos computacionales; en esencia es sinónimo de planeación. Por lo tanto, la programación lineal involucra la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo; esto es, el resultado que mejor alcance la meta especificada — de acuerdo con el modelo matemático— entre todas las alternativas factibles. Aunque la asignación de recursos a las actividades es la aplicación más frecuente, la programación lineal tiene muchas otras posibilidades. En realidad, cualquier problema cuyo modelo matemático se ajuste al formato general del modelo de programación lineal, es un problema de programación lineal. Por esta razón, un problema de programación lineal y su modelo se denominan con

frecuencia programa lineal, o incluso sólo PL. (Hillier & Lieberman, 2010).

Los problemas de programación lineal están relacionados con el uso eficiente de los recursos limitados para alcanzar objetivos deseados. Este tipo de problemas se caracterizan por el número de soluciones que satisfacen las condiciones fundamentales de cada problema. La elección de una determinada solución, como la mejor solución del problema, dependerá de cierta meta u objetivo global implícito en el planteamiento del problema. Una solución que satisfaga tanto las condiciones del problema como el objetivo dado se denomina una solución óptima (Gass, 1975).

4.2 Modelos de programación lineal.

Los economistas utilizan modelos para comprender los procesos económicos. Los modelos económicos muestran, a menudo en términos matemáticos, las relaciones entre las variables. Los modelos son teorías simplificadas que muestran las relaciones clave entre las variables económicas. Las variables exógenas proceden de fuera del modelo y las endógenas son las que éste explica. El modelo muestra cómo afectan las variaciones de las variables exógenas a las endógenas. (Mankiw, 2006)

Se usan frecuentemente modelos matemáticos de programación para valorar el agua en agricultura y la industria. Los modelos se desarrollan para que representen la asignación óptima del agua y otros recursos usando como función objetivo la maximización de los beneficios netos, sujeto a restricciones de disponibilidad de los recursos, así como restricciones institucionales (Pérez, 2003).

Un modelo económico es simplemente un marco teórico, y no hay razón inherente de por qué debe ser matemático. Si el modelo es matemático, por lo general consistirá en un conjunto de ecuaciones diseñadas para describir la estructura del modelo. Al relacionar cierta cantidad de variables entre sí en ciertas maneras, estas ecuaciones dan forma matemática al conjunto de suposiciones

analíticas adoptadas. Entonces, mediante la aplicación de operaciones matemáticas destacadas en estas ecuaciones, se puede obtener un conjunto de conclusiones que se deduzcan de manera lógica de esas suposiciones (Chiang & Wainwright, 2006).

Un modelo matemático es un grupo de relaciones matemáticas. En la mayoría de los casos, estas relaciones se expresan en forma de ecuaciones y desigualdades. En estos modelos, el agente económico (consumo, planificador central, o empresa) busca optimizar (maximizar o minimizar) una sola función objetivo (por ejemplo, los excedentes, los costos, ingresos) durante un período de tiempo específico, mientras se enfrenta a restricciones que restringir la elección de ciertos niveles de entradas o salidas. El modelo está sujeto a un conjunto de restricciones (tierra, mano de obra y capital), que maximiza el ingreso neto de los productores de la región, se obtiene el patrón de cultivos óptimo a sembrar y se estima la productividad marginal del agua (precio sombra).

En este modelo se pretende determinar los valores marginales para el uso del agua como un insumo. El valor marginal del agua es también conocido como el "valor sombra" del agua.

El agua entra en los modelos de programación matemática como una restricción de entrada, de manera que su valor marginal se encuentra con la adición de una unidad de agua disponible para la producción y el cálculo de la diferencia entre el valor óptimo antes y después de ese aumento unitario (FAO, 2004b).

4.2.1 Componentes del modelo general de programación lineal.

El modelo de programación lineal tiene tres componentes cuantitativos: un objetivo, los métodos alternativos o procesos para lograr el objetivo y las restricciones de recursos.

La función objetivo es lineal en las incógnitas (Luenberguer & Ye, 2008). Dado el objetivo, a menos que se pueda obtener de más de una manera, no hay problema para ser analizado. Dada la existencia de varios métodos o procesos - diferentes

empresas y diferentes métodos o técnicas de producción de las empresas - por las que se puede alcanzar el objetivo, se elige entre ellos los métodos o procesos más eficientes para convertir los recursos en el objetivo. Las restricciones consisten de igualdades y/o desigualdades lineales (Luenberguer & Ye, 2008).

Ciertos símbolos se usan de manera convencional para denotar los diversos componentes de un modelo de programación lineal (Hillier & Lieberman, 2010). Estos símbolos se enumeran a continuación, junto con su interpretación para el problema general de asignación de recursos a actividades (Cuadro 12).

- Z = valor de la medida global de desempeño.
- x_j = nivel de la actividad j (para $j = 1, 2, \dots, n$).
- c_j = incremento en Z que se obtiene al aumentar una unidad de la actividad j .
- b_i = cantidad de recurso i disponible para asignarse a las actividades (para $i = 1, 2, \dots, m$).
- a_{ij} = cantidad del recurso i consumido por cada unidad de la actividad j .

El modelo plantea el problema en términos de tomar decisiones sobre los niveles de las actividades, por lo que $x_1, x_2, \dots, x_n$, se llaman variables de decisión.

de c_j , b_i y a_{ij} (para $i = 1, 2, \dots, m$ y $j = 1, 2, \dots, n$) son las constantes de entrada al modelo. Las c_j , b_i y a_{ij} también se conocen como parámetros del modelo.

Cuadro 12. Elementos de un modelo de programación lineal.

Consumo de recursos por unidad de actividad					Cantidad de recursos disponibles
Recurso	Actividad				
	1	2	...	n	
1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}	b_1
2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}	b_2
.					.
.	...	...	...	...	.
.					.
M	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}	b_m

Contribución a Z por unidad de actividad	c_1	c_2	$\dots$	c_n
---	-------	-------	---------	-------

Fuente: Hillier & Lieberman (2010).

4.2.2 Formas de expresar el modelo de programación lineal.

Existen varias maneras de representar un problema de programación lineal dependiendo del criterio de quien realiza la formulación del problema. Las formas son:

Forma general del modelo de programación lineal.

De acuerdo a Kaiser y Messer (2011), la forma general de un modelo LP genérico para n actividades y m restricciones estructurales es la siguiente:

$$\text{Max o Min: } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots c_nx_n \quad (0)$$

s.a.:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots a_{1n}x_n \{\leq, =, \geq\} b_1 \quad (1)$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots a_{2n}x_n \{\leq, =, \geq\} b_2 \quad (2)$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots a_{mn}x_n \{\leq, =, \geq\} b_m \quad (m)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (m+1)$$

El primer componente del modelo (0) es la función objetivo. La función objetivo se expresa en función de las actividades (x_i) que están bajo el control del tomador de decisiones: es decir, $Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. El valor de la función objetivo (Z) mide las soluciones alternativas al problema, como ganancias, costos, ventas, producción, etc. La función objetivo será maximizada o minimizada dependiendo del problema. Las actividades (también denominadas

"variables de decisión" o simplemente "variables") son las variables endógenas desconocidas (determinadas por el modelo) del problema (*ibid.*).

La solución modelo proporciona al tomador de decisiones los niveles de actividad óptimos. Los c_i en la función objetivo se llaman coeficientes de la función objetivo. Estos son parámetros fijos (o coeficientes), que dan la contribución de cada actividad al valor de la función objetivo.

Las ecuaciones numeradas (1) a (m+1) representan el conjunto de restricciones para este problema. La función objetivo se optimiza sujeto a (s.a.) satisfacer todas las restricciones, que definen las restricciones sobre las actividades en el problema. Las restricciones modelan las limitaciones dentro de las cuales debe actuar el tomador de decisiones. Hay dos tipos de restricciones para un modelo LP: restricciones estructurales y una restricción de no negatividad.

Las restricciones estructurales son las primeras m restricciones, que definen la relación técnica entre el uso de recursos ($a_{ij}x_i$) para cada actividad y la dotación de recursos (b_j). Pueden ser: restricciones menores o iguales a ($\leq$); mayores o iguales a ($\geq$) o iguales a ($=$).

Los coeficientes técnicos (a_{ij}) definen la cantidad de recursos i necesarios para producir una unidad de actividad j .

La dotación de recursos (b_j). representa la cantidad de recursos que controla el tomador de decisiones en el proceso de decisión, o representa una condición mínima que debe cumplirse.

La restricción de no negatividad, requiere que todas las actividades sean no negativas (es decir, cero o positivas) (Keisser & Messer, 2011).

Forma utilizando sumatorias del modelo de programación lineal.

$$Max\ z = \sum_j^n c_j x_j$$

$$s. a.: \sum_{j=1}^n a_{ij}x_j \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, m)$$

$$x_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

Forma matricial del modelo de programación lineal.

Para definir la forma matricial del modelo de programación lineal se hace necesario definir todos los vectores y matrices que en el modelo intervienen. La matriz A contiene todos los elementos de asignación unitaria de recursos, y se le denomina matriz de coeficientes tecnológicos:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

El vector x contiene todas las variables del problema y está definido como vector columna:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}$$

En el vector b se involucran todas las disponibilidades de recursos o términos independientes y está definido como un vector columna:

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

El vector c es un vector fila en el que se involucran todos los coeficientes de costo, utilidad, ingreso o precio, según sea el caso:

$$c = (c_1 c_2 \dots c_n)$$

El vector 0 o vector columna cero contiene tantos ceros como variables involucre

el problema y garantiza las restricciones de no negatividad:

$$0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

El modelo matemático de programación lineal en su forma matricial es como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \text{Max } z &= (c_1 c_2 \cdots c_n) \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \\ \text{s. a.: } &\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Forma canónica del modelo de programación lineal.

La forma canónica del modelo matemático de programación lineal, es tal vez la más simple como se encuentra este modelo y con base en ésta es como se desarrollan todas sus demostraciones (Guerrero, 2009). Su forma es la siguiente:

$$\text{Max } z = c \cdot x$$

$$\text{s. a.: } Ax \leq b$$

$$X \geq 0$$

4.2.3 Teoría de la dualidad.

A cada programa primal le corresponde un problema dual. El problema dual permite tener una perspectiva opuesta a la del problema, no obstante que estructuralmente el problema sigue siendo el mismo. Si el primal es un problema de maximización, el dual es un problema de minimización. Las restricciones del primal corresponden a las variables del dual y las variables del primal

corresponden a las restricciones del dual (Hodson, 1996).

De acuerdo a Vanderbei (2001), el problema primal es:

$$\begin{aligned} & \text{Max} \sum_{j=1}^n c_j x_j \\ & \text{s. a.:} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \\ & i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n \\ & x_j \geq 0 \end{aligned}$$

El problema dual correspondiente es:

$$\begin{aligned} & \text{min} \sum_{i=1}^m b_i y_i \\ & \text{s. a.:} \sum_{i=1}^m y_i a_{ij} \geq c_j \\ & i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n \\ & y_i \geq 0 \end{aligned}$$

Para cambiar la dirección de las desigualdades, simplemente se multiplica por menos uno. El resultado equivalente de la representación del problema dual en forma estándar es:

$$-\text{Max} \sum_{i=1}^m (-b_i) y_i$$

$$s. a.: \sum_{i=1}^m (-a_i)y_i \leq (-c_j)$$

$$i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n$$

$$y_i \geq 0$$

Ahora, se puede tomar el dual:

$$-\min \sum_{j=1}^n (-c_j)x_j$$

$$s. a.: \sum_{j=1}^n (-a_{ij})x_j \geq b_i$$

$$i = 1, 2, \dots, m \wedge j = 1, 2, \dots, n$$

$$x_j \geq 0$$

el cual es, claramente, el problema primal (Vanderbei, 2001). La formación del dual regresa al problema primal (Cuadro 13).

Cuadro 13. Relación entre los problemas dual y primal

Primal	Dual
Estructura	
Maximización	Minimización
Minimización	Maximización
Variables	Restricciones
Restricciones	Variables
Coefficientes del objetivo	Límites de las restricciones
Límites de las restricciones	Coefficientes del objetivo
Valores óptimos	
Valor del objetivo	Valor del objetivo
Variables	Precios duales
Precios duales	Variables
Costos reducidos	Holguras o excesos
Holguras o excesos	Costos reducidos

Fuente: Hodson (1996).

Teoremas de dualidad.

1. Si $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ es factible para el primal y $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ es factible para el dual, entonces:

$$\sum_j c_j x_j \leq \sum_i b_i y_i$$

2. Si el problema primal tiene una solución óptima,

$$x^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*),$$

por lo que el dual también tiene una solución óptima,

$$y^* = (y_1^*, y_2^*, \dots, y_n^*),$$

tal que:

$$\sum_j c_j x_j^* = \sum_i b_i y_i^*$$

3. Si $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ es factible para el primal y $(y_1, y_2, \dots, y_n)$ es factible para el dual. Sea $(w_1, w_2, \dots, w_m)$ las correspondientes variables de holgura del primal y sean $(z_1, z_2, \dots, z_m)$ las variables de holgura del dual. Entonces x y y son óptimos para sus respectivos problemas si y solo si: (Vanderbei, 2001)

$$x_j z_j = 0 \text{ para } j = 1, 2, \dots, n,$$

$$w_i y_i = 0 \text{ para } i = 1, 2, \dots, m.$$

4.3 Fuentes de información.

Para llevar acabo los objetivos planteados, se generó una base de datos con información de la superficie sembrada, rendimiento, producción, número de jornales, precios y costos de producción de los principales cultivos de la región, estos datos se obtuvieron de SAGARPA-DRL (2016). Los datos utilizados en el modelo comprenden al año agrícola 2015-2016.

Los cultivos que se emplearon en el modelo se seleccionaron por su importancia económica en la región, los cuales fueron: alfalfa (*Medicago sativa*, L.), avena forrajera (*Avena sativa*, L.), algodón (*Gossypium hirsutum*, L.), sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*), maíz forrajero (*Zea mays*, L.), melón (*Cucumis melon*), sandía (*Citrullus lanatus*), jitomate (*Solanum lycopersicum*), chile (*Capsicum annuum*, L.), maíz grano (*Zea mays*, L.), sorgo escobero (*Sorghum vulgare*) y nuez (*Juglans regia*), los cuales representan los principales cultivos de la región de estudio.

La información relativa a las láminas de riego y a la disponibilidad de agua para uso agrícola se obtuvo de Soto et al. (2016), DOF (2016), CONAGUA e IMTA (2016), SAGARPA (2015a y 2015b) y CONAGUA (2017b).

La ganancia se obtuvo de los ingresos por hectárea menos los costos de producción sin incluir los salarios por el uso de fuerza de trabajo, renta de la tierra y precio del agua (Apéndice 1 y 2).

Con la información recabada se formuló un modelo de programación matemática en la que se realizó la asignación del recurso entre las distintas actividades en que se empleadas en la región, para obtener el precio sombra del recurso. Se propone estimar el precio económico del agua por unidad de recurso mediante la estimación de la productividad marginal del agua.

El modelo tiene como función objetivo maximizar la ganancia total en relación al volumen de riego total por cultivo de los productores de la Región Lagunera. El modelo estará sujeto a varias restricciones: por un lado, sujeto a la disponibilidad de tierra cultivable, al agua de riego (volumen total de m³ por cultivo), a la mano de obra y también se presentaron restricciones de máximos y mínimos de superficie por cultivo.

Los recursos restrictivos del año agrícola fueron: a) 103,793.53 ha regadas por gravedad y 71,570.45 ha regadas con agua de bombeo; b) fuerza de trabajo: 2 803,287 jornales para riego por bombeo y 1,385,330 jornales para riego por

gravedad, y c) 398.506 millones de m³ de agua subterránea y 799,620 270 m³ de agua superficial. Los volúmenes de agua de riego por cultivo incluidos en el modelo se obtuvieron de las láminas de riego aplicadas en el Distrito de Riego 017 (CONAGUA, 2017b).

Se usaron restricciones de máximos y mínimos. La restricción del máximo se aplicó a la alfalfa, a la avena forrajera, maíz forrajero, sorgo forrajero, al sorgo escobero, al algodón y a la nuez correspondiendo con la máxima superficie sembrada del periodo 2011-2016, mientras que la restricción de mínimo comprende la superficie mínima sembrada en los últimos cinco años de los cultivos restantes.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amir, I. & Fisher, F.M (1999). Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agricultural Systems*, 6,(1): 45-56.
- Araneda, H. D. (1993). *Manual 76. Economía política*. Chile: Editorial Jurídica de Chile. 631 p.
- Arrojo, P. (1999). Valor económico del agua. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, No. (45-46): 145-167.
- Ávila y L., J. (2004). *Introducción a la economía*. (3ª ed.). Plaza y Valdés. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 388 p.
- Bueno de Arjona, G. (1987). *Introducción a la Programación Lineal y al Análisis de Sensibilidad*. México: Trillas. 189 p.
- Cachanosky, J. C. (1994). Historia de las teorías del valor y del precio: Parte 1. *Revista Libertas* 20. Instituto Universitario ESEADE .100 p.
- Cámara de Diputados. (2015). Declaratoria de publicidad de dictámenes. De las Comisiones Unidas de Agua Potable y Saneamiento, y de Recursos Hidráulicos, con proyecto de decreto por el que se expide la Ley General de Agua. 5 de marzo. Gaceta Parlamentaria no.4228-II.
- <http://gaceta.diputados.gob.mx/PDF/62/2015/mar/20150305-II.pdf>
- Canedo, P. (2013). Baja disponibilidad de agua en la región. *El Siglo de Torreón*. Recuperado de: <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/852025.baja-disponibilidad-de-agua-en-la-region.html>
- Chase, R.B., Jacobs. F.R. & Aquilano, N.J. (2009). *Administración de Operaciones. Producción y cadena de suministro*. (12ª ed.). México: McGraw-Hill 776 p.
- Chiang, A., y. Wainwright, K. (2006). *Métodos fundamentales de economía matemática*. México: Editorial McGraw-Hill. 688 p.
- Churión, J. R. (1994). *Economía al alcance de todos*. Caracas, Venezuela: Editorial Alfa 191 p.
- Colby, B. G. (1989). Estimating the Value of Water in Alternative Uses. *Natural Resources Journal*, 29: 511-527.
- CONAGUA. (2011). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México. México.181p.
- CONAGUA. (2014). Comisión Nacional del Agua. Atlas del agua en México. México. 139 p.
- CONAGUA. (2015). Comisión Nacional del Agua. Actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero Principal-Región Lagunera (0523), Coahuila, México.
- CONAGUA. (2016). Comisión Nacional del Agua. Atlas del agua en México 137p
- CONAGUA (2017a). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México edición 2017.México. 275p.

- CONAGUA. (2017b). Comisión Nacional del Agua. Informe de distribución de aguas del distrito de riego 017 Región Lagunera ciclo agrícola 2015-2016. México
- Cruz, A. & Levine, G. (1998). El uso de las aguas subterráneas en el distrito de riego 017, Región Lagunera. *International Water Management Institute (IWMI), Serie Latinoamericana*, 3: 31 p.
- DOF. (2018). (Diario Oficial de la Federación. ACUERDO por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican. México. 26 p
- Disponible en <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2018/02/Disponibilidad-Media-Anual-Acuifero-2018DOF.pdf>
- El Siglo de Torreón. (2010). Escasez de agua y arsénico afectan a la Comarca Lagunera. 22 de marzo. El Siglo de Torreón. Recuperado el 16 de agosto de 2015, de <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/509965.escasez-de-agua-y-arsenico-afectan-a-la-comarca-lagunera.html>
- Enciclopedia Medioambiental. (2016). Principales ríos y lagos en el mundo. http://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/aguas/Rios_y_lagos_del_mundo.asp#
- Estrada, A. J. (2014). Disponibilidad del agua para la Región Lagunera. Presentación, Granja Ana, Gómez Palacio, Dgo.
- FAO. (1993). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El estado mundial de la agricultura y la alimentación: las políticas de recursos hídricos y la agricultura. Colección FAO: Agricultura, no.26. 306 p.
- FAO. (2004a). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Política de Desarrollo Agrícola. Conceptos y principios. 591 p.
- FAO. (2004b). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. 187 p.
- FAO. (2012). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (El agua y la seguridad alimentaria. Obtenido de http://www.unwater.org/wwd12/downloads/WWD2012_BROCHURE_ES.pdf
- FAO. (2013). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. FAO Informe sobre temas hídricos no. 38. 78 p.
- FAO. (2016). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. AQUASTAT: Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura de la FAO. Consultado en: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/main/indexesp.stm> (15/07/2017).
- FCEA. (2016). Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental, A.C. Agua en México. Usos y datos generales. Obtenido de [Agua.org.mx: http://www.agua.org.mx/el-agua/agua-en-mexico](http://www.agua.org.mx/el-agua/agua-en-mexico)

- Gaceta del Gobierno del Estado de México. (2009). Manual metodológico para el cálculo de tarifas por el servicio de suministro de agua potable, saneamiento y alcantarillado. México, Estado de México, México. Recuperado el 6 de septiembre de 2015, de <http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/gct/2009/ene051.pdf>
- Garduño, H. (2003). Administración de derechos de agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos. FAO Estudio Legislativo no. 81. Roma. 38 p.
- Gass, S. (1975). Programación lineal. McGraw-Hill. México
- Guerrero, S. H. (2009). Programación lineal aplicada. Ecoe Ediciones. Colombia:
- Hanemann, W. M. (2006). The economic conception of water. In Water Crisis: Myth or Reality Marcelino Botin Water Forum 2004 (pp. 61-91)
- Hillier, F.S. & Lieberman, J. (2010). *Introducción a la Investigación de Operaciones*. (9ª ed.). México: McGraw-Hill. 978 p.
- HLPE. (2015). Contribución del agua a la seguridad alimentaria y nutrición. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición. Roma. 154 p.
- Hodge, I. & Dunn, C. (1992). *Valuing Rural Amenities* Paris, France: OECD publication.
- Hodson, F. (1996). *Maynard. Manual del Ingeniero Industrial* (Vol. IV). México: McGraw-Hill.
- Kaiser, H.M. & Messer, K.D. (2011). Mathematical programming for agricultural, environmental and resource economics. U.S.A.:John Wiley & Sons, Inc 494 p.
- Kahil, T., Dinar, A. & Albiac, J. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology* 522.
- Krajewski, L., Ritzman, L.& Malhotra, M. 2008. *Administración de operaciones*. (8ª ed.) México: Pearson Educación.
- Luenberguer, D.G. & Ye ,Y.(2008). Linear and Nonlinear Programming. (3th ed.) New York USA: Springer. 546 p.
- Macías, R. H., Sánchez, C.I. & Catalán, V.E. (2007). Sistema de Soporte de Decisiones para el Manejo Integral del Agua en el DR017, Coahuila y Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*.
- Mankiw, G. (2006). *Macroeconomía*. (6ª ed.). España: Antoni Bosch 819 p.
- Marshall, A. (1920). *Principles of Economics*. (8th ed.) London: Macmillan. 871 p.
- Marx,K. (2010). El Capital. Critica a la Economía Política. Libro primero. El proceso de producción del capital. Vol. I (trad. Pedro Scaron) Siglo XXI. México 428p. (obra original Das Kapital - Kritik der politischen Ökonomie publicada en 1867)
- Mena, M. J. (1980). *Notas de Programación Lineal*. México: Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo.
- Morales, N. & Rodríguez, T. (2007). Retos y perspectivas de una gestión no sustentable

- del agua en el Área Metropolitana del Valle de México. En Morales, N. y Rodríguez, T. (ed.). *Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas*. (pp.15-68) México: Porrúa.
- Pérez, R. (2003). *Valoración económica del agua*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial. Venezuela: CIDIAT.
- S, B., M. Stair & Michael, E. (2006). *Métodos cuantitativos para los negocios*. (9ª ed.). México: Pearson Educación. 731 p.
- Ricardo, D. (2003). Principios de Economía Política y Tributación (trad. Juan Broc B., Nelly Wolff y Julio Estrada M.) Vol 1. Fondo de Cultura Económica. México. 332 p. (obra original On the Principles of Political Economy, and Taxation, publicada en Londres en 1817)
- Riera, P. (1994). Manual de Valoración Contingente. España. Instituto de Estudios Fiscales. Ministerio de Hacienda. 188p.
- Ríos, F.J.L., Torres, M.M., Castro, F.R., Torres, M.M.A. & Ruiz, T.J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo, 47(1).
- SAGARPA. (2015a). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Agenda Técnica Agrícola de Coahuila. (2ª ed.). México. D.F. 175 p.
- SAGARPA. (2015b). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Agenda Técnica Agrícola de Durango. (2ª ed.) México 170 p.
- SAGARPA-DRL. (2016). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Delegación Región Lagunera. Avances de siembras y cosechas, en la Región Lagunera 2011-2016. Cd. Lerdo, Durango, México.
- Samarawickrema, A. & Kulshreshtha, S. (2009). Marginal Value of Irrigation Water Use in the South Saskatchewan River Basin, Canada. *Great Plains Research*, 19(1): 73-88.
- Savenije, H. & Van der Zaag, P. (2002). Water as an Economic Good and Demand Management, Paradigms with Pitfalls. *Water International*. 1(27): 98-104.
- Schneider, C. & Byers, R. (1982). *Métodos cuantitativos en administración*. México: Limusa. 325 p.
- Singer, P. (1976). Curso de Introducción a la Economía Política. Siglo XXI. México. 257 p.
- Soto, B J. & Gómez G.M.M. (2009). Problemática ambiental en la Región Lagunera. Disponibilidad, extracción y calidad del agua. Universidad Autónoma de Coahuila. *Revista CienciaCierta* (17). Recuperado el 03 de marzo de 2018. <http://www.posgradoeinvestigacion.uadec.mx/CienciaCierta/CC17/CC17problematicalagunera.html>
- Soto, B J., G.M.M Gómez L.W. L.Silva & G.J.A. Valdés. (2016). Derechos de agua y distribución social de los recursos hídricos subterráneos en el Registro Público

- de Derechos de Agua de la Región Lagunera de Coahuila y Durango. Universidad Autónoma de Coahuila. *Revista CienciAcierta* (45). Recuperado el 10 de abril de 2017. http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/03/20/derechos-de-agua-y-distribucion-social-de-los-recursos-hidricos-subterraneos-en-el-registro-publico-de-derechos-de-agua-de-la-region-lagunera-de-coahuila-y-durango/#_ftnref3
- Smith, A. (1994). La riqueza de las naciones. (Libros I-II-III y selección de los libros IV y V). (Trad.Carlos Rodríguez Braun). Alianza Editorial Madrid. (obra original An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations publicada en Londres en 1776)
- Tomek, W.G., & H.M. Kaiser. (2014). Agricultural Product Prices. (5th ed.). Ithaca, NY: Cornell University Press.
- UNESCO & WWDR. (2015). Informe de las Naciones Unidas sobre los recursos hídricos en el mundo 2015: Agua para un mundo sostenible. Datos y Cifras. 12 p.
- Van der Zaag, P. & H. Savenije. 2006. Water as an Economic Good: the value of pricing and the failure of markets. *IWRA, Water International*,27 (19), 98-104.
- Vanderbei, J. R. (2001). Linear Programming: Foundations and Extensions. Second ed. EE.UU.: Department of Operations Research and Financial Engineering, Princeton University, Princeton. 450 p.
- Varian, Harl R. (1992). Microeconomic Analysis. W.W. Norton & Company. New York. 576p.
- Varian, Harl R. (2006). Microeconomía intermedia. Un enfoque actual. (7ª ed.) Barcelona: Antoni Bosch. 792 p.
- Veiga da Cunha, L. (2009). Water: A human right or an economic resource? 97-113 pp. In Llamas M. R; Martínez C.L., and Mukherji A. Wather Ethics: Marcelino Botín *Water Forum 2007*. London: CRC Press. 368 p.
- Villholth, K. G. (2009). Water and ethics in food production and provision—How to ensure water and food security and equity into the 21st century. 81-94 pp. In Llamas M. R; Martínez C.L., and Mukherji A. Wather Ethics: Marcelino Botín *Water Forum 2007*. London: CRC Press. 368 p.
- Walras, L. (1987). Elementos de economía política pura (o teoría de la riqueza social). Alianza Editorial. Madrid, España. 818 p.
- Ward, F. & A. Michelsen. (2002). The economic value of water in agriculture: concepts and policy applications. *Water Polity* 4, 423-446.

6. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

6.1 Tarifas eficientes para el agua de uso agrícola en la Comarca Lagunera

Efficient fees for Comarca Lagunera's agricultural water

Enviado a la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 12 de junio de 2018.

^{1§} Brenda Aracely Ramírez Barraza^{*1}, Adrián González-Estrada², Ramón Valdivia Alcalá¹, José María Salas González¹ y José Alberto García Salazar³.

¹ Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo. Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Edo. de México. C.P. 56230. Tel. (595) 95215 00 ext. 1665.), (ramvaldi@gmail.com), (jmsalasgonzalez@gmail.com). ² Programa Nacional de Economía, Campo Experimental Valle de México-INIFAP. Km 13.5 Carretera Los Reyes-Texcoco, Texcoco, Estado de México, C.P. 56250 (adrglez@prodigy.net.mx.) ³ Economía. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. Km 36.5. Carretera México-Texcoco, Edo. de México. C.P. 56230. (jsalazar@colpos.mx). [§] Autora para correspondencia: brenda.r.economics@gmail.com

Resumen

El agua es un recurso cada vez más escaso por lo que tiene una creciente importancia para la sociedad, razón por la cual resulta pertinente y necesaria la determinación de su precio económico. Los objetivos de esta investigación fueron determinar el precio sombra del agua de uso agrícola suministrada por riego de gravedad y de bombeo en la Región Lagunera, con el fin de calcular las tarifas eficientes, que induzcan un uso óptimo económico del recurso. Se usó un modelo de programación lineal con restricciones de

disponibilidad de fuerza de trabajo, tierra y agua. Se analizaron distintos escenarios de disminución de la disponibilidad del agua con el fin de estudiar el comportamiento de su precio sombra ante los cambios en la cantidad disponible de la misma. Los resultados indican que el precio sombra del agua es \$1.558/m³ para bombeo y \$0.906/m³ para gravedad.

Se concluyó que las cuotas que se pagan por el agua de riego en la región son considerablemente menores que el costo de oportunidad o precio sombra del agua. También se concluyó que la asignación actual del agua de uso agrícola genera un patrón de cultivos ineficiente, pues se emplea para producir alfalfa y otros forrajes, los cuales no aparecen en el patrón óptimo de cultivos calculado con el modelo de programación lineal construido para la Región. Se recomienda que las tarifas sean definidas tomando como referencia el precio sombra del agua, el cual se debe ajustar de acuerdo con los cambios periódicos en el nivel de escasez del agua.

Palabras clave: precio sombra del agua, tarifas eficientes, patrón óptimo de cultivos.

Abstract

Water is an increasingly scarce resource that has an increasing importance for society, so it is pertinent and necessary to determine its economic price. The objectives of this research were to determine the shadow price of water for agricultural use provided by gravity and pumping irrigation in the Lagunera Region, in order to calculate efficient rates, which induce an optimal economic use of the resource. A linear programming model with restrictions on the availability of labor, land and water was used. Different scenarios of

decreasing the availability of water were analyzed in order to study the behavior of its shadow price in the face of changes in the amount available. The results indicate that the shadow price of water is \$ 1,558 / m³ for pumping irrigation and \$ 0.906 / m³ for gravity irrigation. It was concluded that fees paid for water in regional agriculture are considerably lower than the opportunity cost or shadow price of water. The Comarca Lagunera's crops pattern is inefficient and wasteful, because a considerable amount of water is used to produce alfalfa and other forages, which do not appear in the optimal crop pattern calculated with our linear programming model for the Region. It is recommended that the fee for water use should be determined by the shadow price of water, which will vary in accordance with changes in the level of water scarcity.

Key words: water shadow price, efficient fees, optimal crop pattern.

Introducción

El agua es un elemento fundamental de subsistencia; en promedio más del 70 por ciento del agua consumida mundialmente se destina para uso agrícola. Las cantidades de agua requeridas en los sistemas de producción agrícola (cultivo, ganado, y acuicultura) son, muchas veces superiores a los 20 litros que requiere un ser humano. Se estima que entre el 70 y 90% de los suministros de agua dulce en los países en desarrollo son utilizados para producir alimentos. El 75% de los 1.200 millones de personas pobres del mundo dependen de la agricultura como fuente principal de ingresos (Villholth, 2009). Sin embargo, la cantidad de agua disponible se ve afectada directamente por el incremento en la población y por el crecimiento de la economía. En el siglo XX la población mundial se

triplicó aumentando la presión sobre el recurso hídrico, por lo que las extracciones de agua se sextuplicaron, lo cual se ve agravado en regiones con severa escasez de agua, ya que ahí radica cerca de 35% de la población mundial. Además, aproximadamente 65% de los ríos y ecosistemas acuáticos del mundo presentan una degradación media o alta (Kahil *et al.*, 2015).

Entre los principales países con mayor extracción de agua se encuentran India, China y Estados Unidos (CONAGUA, 2014). México se ubica en el noveno lugar, y cuenta con regiones donde la concentración de la población y la actividad económica han generado zonas de alta escasez, debido a que el espacio urbano sobrepasa al sistema natural hídrico en el que se apoya (Morales y Rodríguez, 2007). Las principales zonas demandantes de agua están ubicadas en el Norte y Centro del país, área que concentra 77 % de la población y 84% del Producto Interno Bruto (Garduño, 2003).

Un factor determinante en la disponibilidad de agua es el tamaño de la población y su tendencia a concentrarse en zonas urbanas; se calcula que para el año 2030 la población de México será de 137.5 millones. De 2015 a 2030, la CONAGUA prevé un decremento de 3 692 a 3 250 metros cúbicos por habitante al año, y en algunas regiones alcanzará niveles de escasez cercanos o incluso inferiores a 1 000 metros cúbicos por habitante al año (FCEA, 2017).

El nivel de escasez de agua es un factor detonante de conflicto entre los sectores demandantes (agrícola, pecuario, industrial y urbano) del recurso.

La Comarca Lagunera, ubicada en el Norte de México, presenta problemas agudos de

escasez de agua y sobre-explotación de los mantos acuíferos. El deficiente control de extracciones, la carencia de fuentes adicionales para abastecer a las ciudades, la presencia recurrente de sequías y la competencia entre los usos alternativos del agua, son problemas que se agudizan cada vez más (CONAGUA, 2012). La demanda anual de agua potable para los asentamientos humanos de los 15 municipios de Coahuila y Durango que conforman la Comarca Lagunera, es de 127 millones de metros cúbicos, los cuales se obtienen, en su mayor parte, del subsuelo. Actualmente, la situación es crítica, debido a que se tienen que perforar 300 metros o más para obtener 30 litros de agua, y muchas veces sale contaminada con arsénico, cuando antes se perforaban 30 metros para obtener 300 litros de agua (El Siglo de Torreón, 2010).

La importancia económica de esta región radica en que ocupa el primer lugar en la producción de melón, sorgo forrajero, sorgo escobero, leche de bovino y carne de ave; el segundo lugar en producción de maíz forrajero; tercer lugar en producción de algodón y huevo; cuarto lugar en nogal y alfalfa y es el quinto lugar en producción de carne de caprino. De cada 10 litros que se producen de leche en México, dos corresponden a La Laguna, por lo que se considera como la principal cuenca lechera. También destaca por su potencial de exportación de algodón, carne de ave, carne de bovino, tomate, melón, higo, sandía y nuez, productos agropecuarios que ya incursionan algunos de ellos en el mercado internacional. La Comarca Lagunera juega un papel preponderante en el sector agropecuario, dada su ubicación geográfica, la vocación agrícola y social que ha tendido la región. Se cuenta con 44 mil productores agropecuarios que son atendidos por la SAGARPA mediante tres subdelegaciones, dos distritos de Desarrollo Rural y 16 Centros de Apoyo al Desarrollo Rural (González, 2016).

A pesar de ser una zona de importancia económica en México y de la problemática con el recurso hídrico, no cuenta con suficientes estudios que contribuyan a hacer un uso óptimo del recurso o que establezcan tarifas eficientes entre los distintos sectores usuarios del recurso. Entre los estudios que abordan esta problemática destacan:

Godínez *et al.* (2007) estimaron el valor económico del agua para riego por bombeo y gravedad con un modelo de programación lineal. Los resultados dan un precio sombra de \$0.646 m³ de agua de bombeo y de \$0.582 m³ de agua de gravedad.

García *et al.* (2006) determinaron la demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera para el periodo 2001-2003. Emplearon un modelo de equilibrio espacial e intertemporal. Los resultados muestran que la demanda anual promedio de agua fue de 872.5, 539.2, 67.8, 44.2 y 28.9 millones de metros cúbicos (hm³) en los sectores agrícola de riego por bombeo, agrícola de riego por gravedad, residencial, pecuario e industrial.

Guzmán *et al.* (2006) determinaron los factores que afectan la demanda de agua en los sectores agrícola de riego por bombeo, agrícola de riego por gravedad, pecuario, residencial e industrial de la Comarca Lagunera, México. Emplearon un modelo de ecuaciones simultáneas. Los resultados muestran elasticidades de -0.003 para el sector residencial, -0.002 para la ganadería, -0.108 para la agricultura de riego por bombeo, -0.023 para la agricultura de riego por gravedad y -0.178 para el sector industrial.

En el caso del Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera se cobra una cuota de riego de 1,600 pesos por hectárea sin considerar el tipo de cultivo. Esta cuota alcanza a cubrir

parcialmente los costos de operación, pero no incluye los costos de mantenimiento de los canales ni de las obras principales, así como la pérdida de agua en el proceso de conducción y distribución.

Este precio oficial o precio de mercado en el distrito de riego es muy inferior a su precio sombra o de oportunidad, por lo que, si se usara dicho precio al analizar el sistema de producción no se alcanzaría nunca un óptimo económico.

Para alcanzar este objetivo, suele usarse el precio sombra (Palacios y Excebio, 1989), para hacer una mejor asignación del agua a las actividades que producen el mayor beneficio económico y social (Ward and Michelsen, 2002). La definición del precio eficiente del agua es crucial para mejorar su asignación, fomentar su conservación y mejorar la eficiencia de su uso, tanto a nivel individual como social (Dinar and Subramanian, 1997). Además, el precio sombra ayuda a mejorar la administración de la demanda y a incrementar la recuperación de costos.

Es posible obtener una idea acerca de la viabilidad del costo de recuperación comparando el precio pagado por los usuarios del riego con los costos de la provisión del agua de riego. Es importante saber quiénes obtienen provecho del riego. Los consumidores, por ejemplo, se benefician del agua de riego al tener precios más bajos en los alimentos. La agricultura de riego también puede apoyar el desarrollo económico en las áreas rurales, mediante la creación de fuentes de trabajo y el apoyo a las industrias agroalimenticias en aquellas áreas que, de otra forma, llegarían a estar deshabitadas. Esto explica por qué el gobierno frecuentemente cubre parte de los costos del riego (Hellegers, 2007).

La valoración del agua en función de los costes que induce su disponibilidad debería ser, cuando menos, un punto de partida. El costo de oportunidad del agua de un bien no

depende sólo de los costes que exige su disponibilidad, sino también de su utilidad y escasez. En el caso del agua, es cada vez más necesario considerar su calidad, pues la productividad en sus diversos usos (agrícola, industrial, doméstico y sanitario), dependen en gran medida de sus características físico-químicas (Arrojo, 1999).

En el caso Región Lagunera, se presenta escasez de agua debido a que la oferta del recurso no cubre la demanda, y debido a que no se puede generar agua para cubrir la demanda; esto representa un conflicto de asignación entre los diferentes usuarios del servicio. La distribución del agua se realiza conforme a la importancia del recurso en los diferentes sectores y su asignación es una cuestión social y no se deja a las fuerzas de la oferta y de la demanda, por lo que el precio de igual manera no se comporta como lo explica la teoría económica y es afectado por los subsidios del gobierno. El agua debe tener un precio con el fin de lograr dos objetivos a saber, recuperar el costo de la prestación del servicio de agua en particular y dar una señal clara a los usuarios de que el agua es de hecho un bien escaso que debe ser utilizado con racionalidad económica.

El mercado del agua no es homogéneo ya que los diferentes sub-sectores (agricultura, industria, energía, transporte, protección contra inundaciones) tienen diferentes características. Dado que el agua es un recurso vital para la vida para el cual no hay sustituto, la única elección que hay que hacer es cómo asignar el recurso, y encontrar la forma más eficiente de usarlo. La disponibilidad del agua depende de la variabilidad climática, pero también sobre el uso de la tierra y la interferencia humana. También la demanda varía con el tiempo, tanto a corto como a largo plazo debido a la estructura de la economía y a los cambios poblacionales (Van der Zaag and Savenije, 2006).

Debido a que la disponibilidad del agua y sus usos están directamente determinados por

el desarrollo económico y social, es de vital importancia adoptar medidas para el uso adecuado y eficiente de los recursos hídricos e inducir un manejo integral y sostenible.

La identificación de prioridades e intercambios relativos a la distribución del agua, requieren una cuidadosa y oportuna atención con miras a enfrentar una gama creciente de complicaciones tales como: sustentabilidad de los recursos hídricos, justicia, contaminación, medio ambiente, servicios básicos, desarrollo, competencia y globalización. Las políticas nacionales enfocadas al sector hídrico deben considerar estos temas, ya que, de otra manera, la tendencia a subvaluar y sobreexplotar los recursos hídricos provocará un impacto creciente y negativo sobre la economía global y la sociedad (Asad and Dinar, 2006).

No obstante que el sector agrícola es el principal consumidor de agua, existen pocos estudios que estiman la función de demanda por agua para uso agrícola, su respuesta ante variaciones en los precios y las tarifas que se deben cobrar para inducir un uso eficiente del agua. Los objetivos de esta investigación fueron: a) determinar el precio sombra del agua de riego en la Región Lagunera y b) calcular las tarifas que induzcan un uso óptimo y eficiente.

Materiales y métodos

Los modelos de optimización proporcionan soluciones matemáticas a los problemas que conllevan la maximización o minimización de una función objetivo con un sistema de ecuaciones de restricción bien especificadas. Hay dos tipos de modelo de optimización: modelos de programación matemática y modelos de optimización dinámica. En el modelo

de programación matemática empleado en esta investigación la función objetivo y las restricciones en desigualdades son lineales. La función objetivo consiste en la maximización de la suma de ganancias netas obtenidas en el proceso de producción de los cultivos. El modelo está sujeto a varias restricciones de disponibilidad de recursos: agua, tierra, fuerza de trabajo y de superficie de cultivo.

El modelo consideró: a) 24 variables, 12 cultivos de riego superficial y 12 cultivos de riego con agua de pozo y b) 30 restricciones, 24 restricciones de máximo y mínimo y 6 restricciones correspondientes a la disponibilidad de fuerza de trabajo, tierra y agua. Por último, se realizaron escenarios de disminución del agua disponible de riego para analizar el comportamiento de los precios.

El modelo primal de la programación lineal es:

$$Max \sum_{j=1}^{n=24} c_j x_j$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{m=30} a_{ij} x_j \leq b_i, \quad x_j \geq 0, i = 1, 2, \dots, 30, j = 1, 2, \dots, 24$$

dónde: x_j representa el j-ésimo cultivo del productor, los primeros 12 son cultivos de riego de bombeo y los 12 restantes de riego de gravedad; c_j representa el precio neto del j-ésimo cultivo; a_{ij} representa la cantidad del i-ésimo recurso necesario para producir una unidad del j-ésimo cultivo y b_i representa el monto disponible del i-ésimo recurso. El problema

dual correspondiente es:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{i=1}^m \lambda_i b_i \\ \text{s. a.:} \quad & \sum_{i=1}^{m=30} \lambda_i a_{ij} \geq c_j, \quad \lambda_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, 30, j = 1, 2, \dots, 24 \end{aligned}$$

El Lagrangeano del problema primal es:

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^{n=24} c_j x_j + \sum_{i=1}^{m=30} \lambda_i (b_i - a_{ij} x_j), \quad x_j \geq 0, \lambda_i \geq 0$$

De acuerdo con el Teorema de Khun-Tucker (Intriligator, 1991), las condiciones necesarias para la existencia de una solución óptima son:

$$(c_j - \lambda_i a_{ij}) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 24, \quad i = 1, 2, \dots, 30 \quad (1)$$

$$(c_j - \lambda_i a_{ij}) x_j \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 24, \quad i = 1, 2, \dots, 30 \quad (2)$$

$$(b_i - a_{ij} x_j) \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 24, \quad i = 1, 2, \dots, 30 \quad (3)$$

$$(b_i - a_{ij} x_j) \lambda_i \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 24, \quad i = 1, 2, \dots, 30 \quad (4)$$

$$x_j \geq 0, \lambda_i \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, 24, \quad i = 1, 2, \dots, 30 \quad (5)$$

De acuerdo con Intriligator (1991), dado que los conjuntos de factibilidad de los problemas primal y dual no son vacíos en el caso de la presente investigación, y que la función objetivo es casi-cóncava y las restricciones son convexas, porque son lineales, entonces las condiciones anteriores son necesarias y suficientes para la existencia de una

solución óptima. La llamada *condición complementaria de holgura*, requiere que se cumplan las condiciones (2) y (3).

De acuerdo con lo anterior, si alguna restricción se cumple como una estricta desigualdad, entonces la variable dual correspondiente es cero en la solución. Si la variable es un número positivo en la solución, entonces la restricción correspondiente se satisface como una estricta igualdad.

Por otra parte, nótese que:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda_i} = (b_i - a_{ij}x_j) \cdot \lambda_i \geq 0 \quad (= 0, \quad \text{si } \lambda_i > 0)$$

En consecuencia, los multiplicadores de Lagrange: λ_i , $i = 1, 2, \dots, 30$, representan los precios sombra de los recursos cuyas disponibilidades restringen al modelo.

De acuerdo con lo anterior, los lambda correspondientes a la restricción de la disponibilidad de agua de bombeo y de gravedad son los precios sombra del agua λ_{29} y λ_{30} , y expresan en cuánto aumenta el valor óptimo de la función objetivo si la disponibilidad de agua aumenta en una unidad. Una interpretación análoga tienen los demás multiplicadores de Lagrange. El precio marginal del agua, precio sombra o costo de oportunidad, está relacionado con un cambio en el valor total de un producto, asociado con varios niveles de aplicación de agua; es decir, el precio marginal del agua es un precio económico de una unidad extra de agua en el punto óptimo (Samarawickrema and

Kulshreshtha, 2009 y Tang, 2004).

Los modelos de programación matemática frecuentemente son utilizados para determinar el precio económico del agua de riego y de las aguas subterráneas. El modelo anterior está diseñado para servir como una herramienta para la toma de decisiones que son responsabilidad de los planificadores de la producción agrícola a nivel de distrito de riego. La solución del modelo es un conjunto de actividades o cultivos que maximizan la suma de las ganancias de la producción agrícola (Amir and Fisher, 1999). Esa combinación de cultivos representa la asignación óptima del agua y de otros recursos de la producción, usando como función objetivo la maximización de las ganancias totales o agregadas, sujeta a las restricciones de disponibilidad de los recursos y a las restricciones institucionales (Pérez, 2003). La validez del modelo requiere de productores que maximicen el ingreso y empleen insumos productivos hasta el punto en que el producto marginal es igual al costo de oportunidad (FAO, 2004).

Los cultivos analizados fueron: alfalfa (*Medicago sativa* L.), avena forrajera (*Avena sativa* L.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.), sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*), maíz forrajero (*Zea mays* L.), melón (*Cucumis melo*), sandía (*Citrullus lanatus*), jitomate (*Solanum lycopersicum*), chile (*Capsicum annum* L.), maíz grano (*Zea mays* L.), sorgo escobero (*Sorghum vulgare*) y nuez (*Juglans regia*), los cuales representan los principales cultivos de la región de estudio.

Los datos utilizados en el modelo comprenden al año agrícola 2015-2016. La información

se obtuvo de SAGARPA-DRL (2016), Soto *et al.* (2016), DOF (2016), CONAGUA e IMTA (2016), SAGARPA (2015) y CONAGUA (2017). El precio neto se obtuvo de los ingresos por hectárea menos los costos de producción sin incluir los salarios por el uso de fuerza de trabajo, renta de la tierra y precio del agua.

Los recursos restrictivos del año agrícola fueron: a) 103 793.53 ha regadas por gravedad y 71 570.45 ha regadas con agua de bombeo; b) fuerza de trabajo: 2 803 287 jornales para riego por bombeo y 1 385 330 jornales para riego por gravedad, y c) 398.506 Hm³ de agua subterránea y 799.62 Hm³ de agua superficial. Los volúmenes de agua de riego por cultivo incluidos en el modelo se obtuvieron de las láminas de riego aplicadas en el Distrito de Riego 017 (CONAGUA, 2017).

La restricción del máximo se aplicó a la alfalfa, a la avena forrajera, maíz forrajero, sorgo forrajero, al sorgo escobero, al algodón y a la nuez correspondiendo con la máxima superficie sembrada del periodo 2011-2016, mientras que la restricción de mínimo comprende la superficie mínima sembrada en los últimos cinco años de los cultivos restantes (Cuadro 1).

Cuadro 14. Restricciones de máximo y mínimo de los cultivos del modelo

<i>Variable</i>	Cultivo (riego con agua de pozo)	Ha	<i>Variable</i>	Cultivo (riego con agua superficial)	ha
X_1	Alfalfa	34 363.20	X_{13}	Alfalfa	5 901.15
X_2	Avena forrajera	17 551.20	X_{14}	Avena forrajera	838.00
X_3	Algodón	1 446.08	X_{15}	Algodón	24 835.47

X_4	Sorgo forrajero	14 422.40	X_{16}	Sorgo forrajero	17 335.78
X_5	Maíz forrajero	32 679.16	X_{17}	Maíz forrajero	17 027.56
X_6	Melón	3 771.00	X_{18}	Melón	765.30
X_7	Sandía	244.00	X_{19}	Sandía	333.65
X_8	Tomate rojo (jitomate)	656.00	X_{20}	Tomate rojo (jitomate)	7.00
X_9	Chile verde	221.00	X_{21}	Chile verde	169.40
X_{10}	Maíz grano	168.00	X_{22}	Maíz grano	724.50
X_{11}	Sorgo escobero	604.00	X_{23}	Sorgo escobero	2,142.70
X_{12}	Nuez	4,301.75	X_{24}	Nuez	4,899.65

Resultados y discusión

Los resultados del modelo base 1 de programación lineal indican que: a) el patrón óptimo de cultivos es de 51 831.08 ha, de las cuales 31.8% son de riego por bombeo y 68.3%, de gravedad; b) producción nula para los cultivos de alfalfa, avena forrajera, sorgo forrajero, maíz forrajero y sorgo escobero, debido a que esos cultivos son grandes consumidores de agua y a que su relación ingreso-costos es menor en comparación con la de los demás cultivos (Cuadro 2); c) se indica un incremento de la superficie sembrada de algodón, ya que genera mayores ganancias, y d) otro cultivo que genera ganancias considerables son las plantaciones de nuez, las cuales se consideraron como una restricción de máximo. Si se hubiesen considerado como mínimo la mayor parte de la superficie se habría destinado a este cultivo.

Cuadro 2. Patrón óptimo de cultivos.

Cultivo	Gravedad Ha	%	Bombeo Ha	%
Alfalfa	0	0.0	0	0.0
Avena forrajera	0	0.0	0	0.0
Algodón	24835.47	47.9	1446.08	2.8
Sorgo forrajero	0	0.0	0	0.0
Maíz forrajero	0	0.0	0	0.0
Melón	765.30	1.5	3771	7.3
Sandía	333.65	0.6	244	0.5
Tomate rojo (jitomate)	3633.02	7.0	6 318.26	12.2
Chile verde	169.40	0.3	221	0.4
Maíz grano	724.50	1.4	168	0.3
Sorgo escobero	0	0.0	0	0.0
Nuez	4 899.65	9.5	4 301.75	8.3
Total	35 360.99	68.2	16 470.09	31.8

El valor de la función objetivo que maximización las ganancias totales en el modelo base 1 es de 1 743 millones de pesos. Los resultados muestran que el precio sombra del agua de riego por bombeo es \$1.558 por m³ y el de riego por gravedad es \$0.906 por m³, lo que indica que, ante un aumento de un metro cúbico en la cantidad disponible de agua, la función objetivo se incrementa en \$1.558 y \$0.906 respectivamente.

El multiplicador de Lagrange (precio sombra) correspondiente al agua de bombeo es mayor, ya que los cultivos con riego por bombeo tienen una mayor productividad; es decir, requieren de menos agua por unidad de producción y tienen un menor índice de pérdida de agua que los cultivos con riego por gravedad (Cuadro 3).

En el escenario 2, se analizó una disminución de la disponibilidad del agua en 1%, con el objeto de ver su comportamiento en relación con el escenario base 1. Los resultados

indican que, al disminuir la disponibilidad de agua, el valor de la función objetivo obtenida es de 1 729 millones de pesos; es decir, disminuye en 0.8% con relación al escenario base 1. En relación con la superficie cultivada, ésta tuvo una disminución de 0.7%. El precio sombra se mantuvo constante.

En los escenarios donde el agua disponible disminuye de 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14% el precio sombra se mantiene constante en \$1.558 /m³ para bombeo y en \$0.906 /m³ para gravedad. En el escenario donde la cantidad disponible disminuye 16%, el precio sombra del agua de riego por gravedad que se obtiene es de \$1.227 /m³ mientras que el de bombeo sigue siendo de \$1.558 /m³. El valor de la función objetivo es de 1 527 millones de pesos, es decir, 12.39 % menor con relación al escenario base 1.

Cuadro 3 Precio sombra del agua

Disminución en la disponibilidad de agua (%)	Valor de la función objetivo (millones de pesos)	Precio sombra \$/m ³	
		Bombeo	Gravedad
0	1743	1.558	0.906
1	1729	1.558	0.906
2	1716	1.558	0.906
12	1581	1.558	0.906
14	1554	1.558	0.906
16	1527	1.558	1.227
20	1463	1.558	1.227

Con el fin de comparar el precio sombra obtenido con la tarifa actual fue necesario estimar la magnitud de esa tarifa, debido a que, al igual que en muchos distritos de riego en México, no se cobra el agua por volumen, sino por hectárea. La tarifa media pagada se

obtuvo mediante la división del costo (cuota) por ha entre el volumen medio por ha.

Dado que la cuota de riego que pagan en la Región Lagunera es \$1,600 por hectárea y tomando en cuenta el volumen de riego (m^3 por ha) promedio de los principales cultivos, entonces el costo promedio sería \$0.09 por m^3 para riego por gravedad (Cuadro 4) en los principales productos agrícolas de la región.

Los resultados anteriores permiten hacer una comparación entre la tarifa promedio pagada (\$0.09 por m^3) y la tarifa estimada con el modelo (\$0.906 por m^3), lo que demuestra que la tarifa pagada por unidad de agua de riego de gravedad es 9.06 veces menor al precio sombra obtenido con el modelo. Esto indica que las tarifas que se pagan en la Región Lagunera no corresponden con el precio sombra del agua aquí obtenido, por lo que se concluye que se está haciendo un uso ineficiente del agua.

Cuadro 4 Costo del agua de los cultivos considerando una cuota de agua de \$1,600/ha

Cultivo	Precio \$/ m^3
Alfalfa	0.14
Avena Forrajera	0.10
Algodón	0.10
Sorgo Forrajero	0.09
Maíz Forrajero	0.10
Melón	0.07
Sandía	0.07
Tomate	0.06
Chile	0.10
Maíz Grano	0.14
Sorgo Escobero	0.06
Nuez	0.11

Conclusiones

El patrón de cultivos de la Comarca Lagunera es ineficiente y carente de racionalidad económica. El patrón óptimo de cultivos obtenido con el modelo señala claramente que no se deberían sembrar en la región cultivos forrajeros, como la alfalfa, sorgo y maíz, ya que son de bajo precio y densidad económica y, sin embargo, requieren de mucha agua para su producción.

Después de comparar los precios sombra del agua con el precio promedio que se cobra por el agua de riego por gravedad, se concluye que las cuotas de riego que se pagan en la región son considerablemente menores que el costo de oportunidad social o precio sombra del agua.

El precio tan bajo que pagan en la región por el agua de riego, es en realidad una transferencia injustificada de la sociedad, a través del gobierno. El agua es un insumo muy escaso y de vital importancia para el desarrollo económico de la región y para sus principales actividades económicas: la agricultura y la ganadería y debería usarse más racional y eficientemente.

El precio sombra o de eficiencia obtenido con en el modelo puede ser empleado como un indicador para establecer tarifas para el consumo eficiente de agua en el sector agrícola de la Región Lagunera.

Se recomienda que se lleven a cabo otras investigaciones como ésta en las que se incorporen todas las actividades productivas de la región (ganadería, acuacultura entre

otras), con el fin de ver la estabilidad de los indicadores de eficiencia en el uso del agua. También se recomienda que las tarifas sean definidas con base en el precio sombra del agua y que se ajusten de acuerdo con los cambios en el nivel de escasez del recurso, ya que la cantidad de agua disponible afecta a todos los sectores demandantes: el industrial, el urbano y el agropecuario.

Revisión de bibliografía

Amir, I., and F.M. Fisher. 1999. Analyzing agricultural demand for water with an optimizing model. *Agricultural Systems*. 1(61), julio: 45-56.

Asad, M., and A. Dinar. 2006. The role of water policy in Mexico (El rol de la política del agua en México - consideraciones sobre sustentabilidad, equidad y crecimiento económico). En breve; no. 95. World Bank. Washington, DC.

<http://documents.worldbank.org/curated/en/925721468046450133/El-rol-de-la-politica-del-agua-en-Mexico-consideraciones-sobre-sustentabilidad-equidad-y-crecimiento-economico>

Arrojo, A.P. 1999. Valor económico del agua. *Afers Internacionales*. No. 45-46:145-167.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Atlas del agua en México. México. 139 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2012. Atlas Digital del Agua México. 133 p.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2016. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. México.

<http://www.edistritos.com/DR/estadisticaHidrometrica/distrito.php>

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2017. Informe de distribución de aguas del

- distrito de riego 017 Región Lagunera ciclo agrícola 2015-2016. México, D.F. 10 p.
- Dinar, A., and A. Subramanian. 1997. Water Pricing Experiences. An Internacional Perspective. In: Water Pricing Experiences. An Internacional Perspective. The World Bank. Washington, D.C. 164 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 2016. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea. Acuífero (0523) Principal-Región Lagunera. 21 de junio. México. 10 p.
http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5441871&fecha=21/06/2016.
- El Siglo de Torreón. 2010. Escasez de agua y arsénico afectan a la Comarca Lagunera. El Siglo de Torreón. 22 de marzo de 2010.
<https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/509965.escasez-de-agua-y-arsenico-afectan-a-la-comarca-lagunera.html>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2004. Economic valuation of water resources in agriculture. From the sectoral to a functional perspective of natural resource management. Rome. 187 p.
- Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental (FCEA). 2017. Agua en México. Un prontuario para la correcta toma de decisiones. FCEA. México. 47 p.
- García, S. J., E.S. Guzmán y M.H. Fortis 2006. Demanda y distribución del agua en la Comarca Lagunera, México. Agrociencia. 40(2): 269-276.
- Garduño, H. 2003. Administración de derechos de agua. Experiencias, asuntos relevantes y lineamientos. Roma, Italia: FAO. 38 p.
- Godínez, M. L., J. A. García S., M. Fortis H., J. S. Mora F., M. Á. Martínez D. R. Valdivia A., y J. Hernández M. 2007. Valor económico del agua en el sector agrícola de la

- Comarca Lagunera. *Terra Latinoamericana*. 25 (1): 51-59.
- González, D. 2016. La Laguna destaca en producción agrícola. *El Siglo de Torreón*. 6 de julio de 2016. México. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1241023.la-laguna-destaca-en-produccion-agricola.html?oprd=1FirefoxHTML\Shell\Open\Command>
- Guzmán, S. E., J. A. García S., J. S. Mora F., M. Fortis H., R. Valdivia A., y M. Portillo V. 2006. La demanda de agua en la Comarca Lagunera, México. *Agrociencia* 40 (6): 793-803
- Intriligator, M.D. 1991. *Mathematical Optimization and Economic Theory*. Prentice-Hall. Englewood, N.J. 486 p.
- Kahil, T., A. Dinar, and J. Albiac. 2015. Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation climate change in arid and semiarid regions. *Journal of Hydrology* 522: 95-109.
- Morales, N.J.A. y T.L. Rodríguez. 2007. Retos y perspectivas de una gestión no sustentable del agua en el Área Metropolitana del Valle de México. *In: Morales, N. J.A. y Rodríguez, T. L. Economía del agua. Escasez del agua y su demanda doméstica e industrial en áreas urbanas*. Porrúa. México. 15-68 pp.
- Palacios, V.E. y G.A. Excebio. 1989. *Introducción a la teoría de la operación de distritos y sistemas de riego*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 482 p.
- Pérez, R.J.A. 2003. *Valoración económica del agua*. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Caracas, Venezuela. 45 p.
<http://webdelprofesor.ula.ve/cidiat/prjose/Investigaciones/PONENCIA%20DEFINITIVA.pdf>
- Samarawickrema, A., and S. Kulshreshtha. 2009. *Marginal Value of Irrigation Water Use*

in the South Saskatchewan River Basin, Canada. Great Plains Research. 19(1): 73-88.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA)-DRL Delegación Región Lagunera. 2016. Avances de siembras y cosechas, en la Región Lagunera 2011-2016. Cd. Lerdo, Durango, México.

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).2015. Agenda Técnica Agrícola de Coahuila. Segunda edición. México. D.F. 175 p.

Soto, B J., G.M.M Gómez, L.W. L. Silva y G.J.A. Valdés. 2016. Derechos de agua y distribución social de los recursos hídricos subterráneos en el Registro Público de Derechos de Agua de la Región Lagunera de Coahuila y Durango. *CienciAcierta* (45). Recuperado el 10 de abril de 2017. http://www.cienciacierta.uadec.mx/2016/03/20/derechos-de-agua-y-distribucion-social-de-los-recursos-hidricos-subterraneos-en-el-registro-publico-de-derechos-de-agua-de-la-region-lagunera-de-coahuila-y-durango/#_ftnref3

Tang, S.L. 2004. Linear Optimization in Applications. Hong Kong University Press. 164p

Van der Zaag, P., and H. Savenije. 2006. Water as an Economic Good: the value of pricing and the failure of markets. IWRA, Water International. vol 27, no. 19, march. 98-104 pp.

Villholth, G.K. 2009. Water and ethics in food production and provision—How to ensure water and food security and equity into the 21st century?. *In: Llamas M. R. Martínez C.L., and Mukherji A. Water Ethics: Marcelino Botín Water Forum* 2007. CRC Press. London. 81-94 pp.

Ward, F., and A. Michelsen. 2002. The economic value of water in agriculture: concepts

and policy applications. Water Policy 4: 423-446.

6.2 Productividad y eficiencia del uso de agua de riego por gravedad en la Comarca Lagunera

Productivity and efficiency of irrigation water in Laguna Region

Enviado a la Revista NovaScientia el 25 de octubre de 2018

Brenda Aracely Ramírez Barraza¹, Adrián González-Estrada², Ramón Valdivia Alcalá¹, José María Salas González¹ y José Alberto García Salazar³.

Palabras clave: costo de oportunidad del agua, valor marginal del agua, eficiencia del agua de riego

Keywords: water opportunity cost, marginal value of water, irrigation water efficiency.

Resumen

Introducción: La Comarca Lagunera de México es una región con escasa precipitación y sequías recurrentes, en la que el sector agrícola es el mayor consumidor de agua. La poca disponibilidad del recurso y la competencia entre los distintos sectores hace necesaria una asignación eficiente del agua del distrito de riego.

Método: Se especificó y estimó una función de producción que relaciona la ganancia con el volumen de agua empleado en los principales cultivos de la Comarca Lagunera.

Resultados: La productividad marginal del agua fue de \$0.414 m³, que equivale a \$7,719 por hectárea. Se concluyó que la cuota por hectárea que pagan por el agua los productores agrícolas, \$1,600, es considerablemente inferior a la productividad marginal del agua, y no refleja su costo de oportunidad o precio sombra.

Discusión o Conclusión: Con el fin de incentivar el uso eficiente del agua e inducir mayores ganancias y mejoría del bienestar de sus pobladores, se recomienda cobrar por el agua una cuota acorde con su costo de oportunidad. El patrón de cultivos se debe de enfocar en la producción de aquellos cultivos con alto precio.

¹ Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo. E-mail: brenda.r.economics@gmail.com

² Programa Nacional de Economía, Campo Experimental Valle de México-INIFAP y Posgrado de la División de Ciencias Económico-Administrativas. Universidad Autónoma Chapingo.

³ Economía. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados.

© Universidad De La Salle Bajío (México)

Abstract

Introduction: Comarca Lagunera is a Mexican region with a scarce precipitation and frequent drought, where the agricultural sector is the largest consumer of water. The low availability of

the resource and the competition between the different sectors make it necessary an efficient allocation of water from the irrigation district.

Method: A production function was specified and estimated, which relates profits with the volume of water used in Comarca Lagunera's main crops.

Results: The marginal productivity of water was \$0.414 m, which is equivalent to 7,719 pesos per hectare. It was concluded that the fee farmers pay for water per hectare, \$1,600, is considerably lower than water marginal productivity, and does not reflect their opportunity cost or shadow price.

Discussion or Conclusion: In order to introduce the efficient use of water, induce higher profits, and improve of the well-being of its inhabitants, it is recommended to charge a fee according to the water opportunity cost. The crop pattern should focus on the production of those crops with high price.

Introducción

La agricultura de riego consume el 70% de las extracciones de agua a nivel mundial, el sector industrial —incluida la producción de energía— el 20% y el 10% las actividades domésticas. La producción de alimentos, principalmente la de riego, utilizan la mayor parte del agua dulce extraída del subsuelo. A nivel mundial, el agua es indispensable para el crecimiento económico, la generación de ingresos y la producción y el acceso a los alimentos (HLPE, 2015,29).

El uso irrestricto de agua ha crecido a nivel global a un ritmo mayor que el doble de la tasa de crecimiento de la población durante el siglo XX. Ese crecimiento ha llegado a tal punto, que en muchas regiones ya no es posible el suministro fiable del agua. La presión demográfica, el ritmo de desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre ese recurso renovable pero finito, sobre todo, en regiones áridas y semiáridas. La agricultura no es el único sector económico en el que la escasez de agua tiene una relevancia crítica. Bajo la presión conjunta del crecimiento de la población y el consumo de alimentos, la demanda por agua está aumentando en todas las regiones del mundo (FAO, 2013, ix). Se espera que la demanda mundial por agua para la producción de alimentos y energía aumenten, aproximadamente, 60% y 80%, respectivamente, antes de 2025 (WWDR,2018,2). Es por ello, que una gestión hídrica eficiente es una prioridad, ya no sólo a nivel local sino también a escala global; es una condición necesaria del crecimiento económico y del mejoramiento de las condiciones de vida de miles de millones de personas (GWP,2012,1).

La gestión eficiente y sostenible del agua, así como de la infraestructura correspondiente para asegurar un suministro seguro, fiable y asequible de agua, son vitales para mejorar el nivel de vida, expandir las economías locales y promover la creación de puestos de trabajo más dignos y una mayor inclusión social. Son también un motor esencial para el crecimiento verde y el desarrollo sostenible (WWAP,2016,2).

A nivel nacional, México experimenta un grado de presión sobre el agua igual a 19.2%, lo cual se considera bajo. Sin embargo, existe una gran diversidad a nivel regional. El menor grado de presión hídrica se presenta en la región hidrológico-administrativa XI, Frontera Sur, con 1.7%, mientras que la región con más alto grado de presión se encuentra en la zona Centro, en la región hidrológica-administrativa XIII, Aguas del Valle de México, con 138.7% (CONAGUA, 2016, 94). Además, la zona Norte de México presenta presión alta, debido a la gran escasez de agua, con la cual se tiene que cubrir la muy cuantiosa demanda por la misma.

El sector agrícola es el mayor consumidor de agua, 76.3% del total. La superficie de las unidades agrícolas de producción para el ciclo 2015-2016 fue de 30.2 millones de hectáreas, 18% de riego y el resto, de temporal. La superficie sembrada anualmente ha

variado entre 21.4 y 21.9 millones de hectáreas durante el periodo 2006-2016. Anualmente, la superficie cosechada en ese mismo periodo (considerando el año agrícola y cultivos perennes, en régimen de riego y temporal) oscila entre 19.9 y 21.2 millones de hectáreas por año (SIAP, 2017 en CONAGUA, 2017, 86).

La Comarca Lagunera es una región que se caracteriza por ser una zona árida, con clima muy seco y escasa precipitación, por lo que presenta problemas de sequías recurrentes. Se encuentra en el Distrito de Riego 017 y comprende los municipios de Gómez Palacio, Lerdo, Tlahualilo, Nazas, Rodeo, Mapimí, San Juan de Guadalupe y Simón Bolívar, del estado de Durango, así como los municipios de Torreón, Matamoros, San Pedro de las Colonias, Francisco I. Madero y Viesca, del estado de Coahuila (Figura 1). Se ubica geográficamente en las Cuencas Centrales del Norte, específicamente en la Región Hidrológica 36, que se conforma por las cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval (Macías *et al*, 2007, 77). Su principal actividad económica es la agropecuaria y tiene cerca de 38 mil productores, tanto del sector privado como del ejidal (Vargas, 2017). Ocupa el primer lugar a nivel nacional en la producción de melón, sorgo forrajero, sorgo escobero, leche de bovino y carne de ave; el segundo lugar en producción de maíz forrajero; el tercero en producción de algodón y huevo; el cuarto en la producción de nogal y alfalfa y el quinto en producción de carne de caprino (González, 2016). En el ciclo agrícola 2015-2016 se sembraron 102,184.51 ha bajo la modalidad de riego por bombeo, 45,655.11 ha de riego por gravedad y 31,493.85 ha de temporal. Esas actividades generaron un ingreso de 7,055.7 millones de pesos. Los cultivos más importantes por cuanto a superficie sembrada con la modalidad de riego por gravedad en el Distrito de Riego 17 fueron: avena forrajera, algodón, maíz forrajero, maíz grano, melón, chile verde, sandía, sorgo escobero, sorgo forrajero, jitomate, alfalfa verde y nuez, los cuales representan el 98% de la superficie total sembrada de riego por gravedad en la región (SAGARPA-DRL, 2016).

La agricultura de riego por gravedad es abastecida con agua de presa; el volumen distribuido para riego fue de 799.62 Hm³ para el mismo periodo (CONAGUA e IMTA, 2016).

La relativamente baja disponibilidad de agua y la competencia entre los distintos sectores consumidores hace necesaria una eficiente administración de la misma. Además, es importante una gestión racional para conseguir un aprovechamiento eficiente y

equitativo que favorezca la conservación y protección de los recursos hídricos (ICWE,1992,4), en especial en el sector agrícola de las regiones áridas y semiáridas, donde el incremento de la extracción de agua aumenta conviviendo con una extrema competencia por los recursos hídricos. Más aun, se prevé que el cambio climático agravará la escasez de agua y aumentará la recurrencia e intensidad de las sequías en esas regiones (Kahil *et al*, 2015,95). En consecuencia, es de gran importancia identificar y evaluar opciones de adaptación de la agricultura al cambio climático, a corto y mediano plazos (Ojeda *et al*, 2012,72).

El agua de riego generalmente es suministrada por agencias públicas que le dan un precio en función de su costo promedio de entrega (Young y Loomis, 2014,3) el cual, en la mayoría de los casos, no representa el valor marginal del agua.

Con el fin de afrontar esos problemas y retos, el objetivo de esta investigación fue estimar económicamente el valor marginal del agua de riego de gravedad en la Región Lagunera

El valor marginal del agua refleja la ganancia de aplicar una unidad adicional de agua en un determinado cultivo. Se estima como la diferencia entre la ganancia adicional y el costo de la aplicación de la unidad marginal de agua al cultivo (Samarawickrema y Kulshreshtha, 2009, 73).

Determinar el valor marginal del agua es importante en proyectos estratégicos, ya que puede servir como apoyo en la toma de decisiones de política en relación con la distribución del agua entre los diferentes usuarios. El conocimiento del valor marginal del agua sirve para demostrar en qué medida el uso y distribución del agua pueden ser guiados por el mercado, o si es necesaria la intervención pública para mejorar la eficiencia y el bienestar social.

La hipótesis que orientó esta investigación establece que la cuota del agua de riego que pagan los productores al DDR es menor que el valor marginal del agua, lo cual es fuente de graves ineficiencias y de pérdidas considerables de posibilidades para mejorar el bienestar social.

Método

Shen y Lin (2017, 21) estimaron los precios sombra del agua para uso agrícola y las eficiencias técnicas, con datos de 30 provincias de China continental, de 2002 a 2012. Ziolkowska (2015, 20) aplicó el método de valuación residual para estimar el precio sombra del agua para riego en tres estados de High Plains: Texas, Kansas y Nebraska, con cinco cultivos predominantes: maíz, algodón, sorgo, soja y trigo. Lall y Wang (1999,1) usaron el enfoque de productividad marginal para valorar el agua para uso industrial, derivan un modelo y estimaciones de la elasticidad-precio del uso del agua por las industrias chinas. Encuentran que la productividad marginal del agua varía entre sectores en China, con un promedio industrial de 2.5 yuanes por metro cúbico de agua. Valdivia *et al* (2011, 459) determinaron el valor económico del agua en el sector industrial en la cuenca del río Amajac, en el estado de Hidalgo, mediante el método de valoración contingente.

Con el fin de alcanzar los objetivos de esta investigación, se especificó y estimó una función de producción que relaciona la ganancia con el volumen de agua empleado en los principales cultivos de la Comarca Lagunera. Se realizaron 11 escenarios de disminución de la disponibilidad de agua de riego, para ver el comportamiento de la productividad marginal y de las ganancias. La especificación de la función de producción fue la siguiente:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_t + \beta_2 X_{2t}^2 + \epsilon_t$$

donde Y_t es la ganancia, calculada como la diferencia entre el ingreso y el costo, X_t es el volumen de agua utilizado para generar ese nivel ganancias y ϵ_t es el término de error.

La productividad marginal del agua, PMg_a , es la derivada parcial de la función de ganancias Y_t con respecto al volumen de agua X_t :

$$\frac{\partial Y}{\partial X} = PMg_a$$

El valor marginal del agua representa la contribución de una unidad adicional de agua a cualquier objetivo público o privado que se considere; proporciona información importante para el análisis de políticas de desarrollo o asignación de agua. Las decisiones relacionadas con el aumento del suministro de agua y la eficiencia económica requieren

que la disponibilidad de agua se amplíe siempre que el valor marginal de la misma exceda su costo marginal.

Para las decisiones de asignación del agua escasa entre usos que compiten, la eficiencia económica ocurre solo cuando el valor marginal por unidad de agua es igual para todos los usos. Es decir, las políticas mejoran la eficiencia económica cuando reasignan agua entre los usuarios si el valor marginal ganado excede el valor marginal perdido (Ward y Michelsen, 2002,430).

En la función se utilizaron los principales cultivos de la región: alfalfa (*Medicago sativa L.*), avena forrajera (*Avena sativa L.*), algodón (*Gossypium hirsutum L.*), sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*), maíz forrajero (*Zea mays L.*), melón (*Cucumis melo*), sandía (*Citrullus lanatus*), jitomate (*Solanum lycopersicum*), chile (*Capsicum annuum L.*), maíz grano (*Zea mays L.*), sorgo escobero (*Sorghum vulgare*) y nuez (*Juglans regia*).

Los datos utilizados de superficie, precio, rendimiento, costos de producción y láminas de riego se obtuvieron de SAGARPA-DRL (2016) y CONAGUA (2017) y comprenden al año agrícola 2015-2016. Se consideraron precios constantes de 2016.

La ganancia se obtuvo de los ingresos por hectárea menos los costos de producción, sin incluir costos diversos, renta de la tierra y agua. Para la función de producción se emplearon los datos acumulados de ganancias y del volumen de agua (Cuadro 1).

Cuadro 15. Beneficio neto y volumen bruto de agua.

Ganancia (Y) (Millones de pesos)	Volumen bruto de agua (X) Hm³
381.1154217	168.1526018
585.1210267	248.546059
764.4387021	528.8878068
838.8688761	594.7722899
868.4447756	617.4064443
885.450442	656.6666444
898.7160637	665.4889188
910.0878783	676.4164849
919.1545391	696.0637579
921.7233513	710.0813696
923.0016619	716.7876636

Fuente: Elaboración a partir de los datos recabados

Resultados

Los resultados del modelo econométrico de la función de producción se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 16. Estimación de los parámetros de la función de producción

Y	Coefficiente	Error estándar	T	P> t	R ²
		Gravedad			
X	1.530433	0.3438332	4.45	0.002	0.977
X ²	-0.0006978	0.0003779	-1.85	0.098	
Constante	184.9639	64.82893	2.85	0.019	

Fuente: Elaborado con los datos obtenidos de la estimación del modelo en STATA.

Para validar los resultados del modelo se realizaron pruebas de significancia individual, $H_0: \beta_k = 0$ vs $H_a: \beta_k \neq 0$.

Para llevar a cabo la prueba, se utilizó la estadística de prueba:

$$t = \frac{b_k - \beta_k}{\sqrt{\text{var}(b_k)}} = \frac{b_k - \beta_k}{\text{se}(b_k)} \sim t_{N-k}$$

tal que, si la hipótesis nula es verdadera

$$t = \frac{b_k}{\text{se}(b_k)} \sim t_{N-k}$$

en términos de *p-value*, se rechaza H_0 si $p \leq \alpha$ y no se rechaza H_0 si $p > \alpha$ (Hill *et al*, 2011, 103 y 110).

Las pruebas de significancia para X y X² con $\alpha = 0.10$ muestran que se rechaza la hipótesis nula, H_0 , lo que indica que los datos respaldan el postulado de que la masa de las ganancias y el volumen de agua están relacionados con un 90% de confiabilidad. El coeficiente de determinación R² para el agua de gravedad fue de 0.977.

La función de productividad marginal del agua de riego por gravedad es:

$$PMg_a = \frac{\partial Y}{\partial X} = 1.530426 - 0.0013956X_t$$

Así, para un volumen de agua de 799.620 hm³, la productividad marginal del agua es de \$0.414m³ con una ganancia de \$962.56 millones de pesos.

Los diversos escenarios de la disminución en la disponibilidad de agua se muestran en el Cuadro 3:

Cuadro 17. Productividad marginal del agua (Pmg).

Disminución en la disponibilidad de agua (%)	Volumen de agua hm ³	Ganancias (millones de pesos)	Productividad marginal del agua \$/m ³
0	799.620	962.56	0.414
1	791.624	959.20	0.426
3	775.631	952.21	0.448
6	751.643	941.07	0.481
9	727.654	929.11	0.515
12	703.666	916.36	0.548
15	679.677	902.80	0.582
18	655.688	888.44	0.615
21	631.700	873.28	0.649
24	607.711	857.32	0.682
27	583.723	840.55	0.716
30	559.734	822.97	0.749

Fuente: Elaborado a partir de los resultados de la función de producción.

En el Cuadro 3 se observa que, conforme aumenta la escasez de agua, las ganancias que surgen de su uso disminuyen y, por el contrario, aumenta la productividad marginal y la valoración marginal del agua; a menor volumen de agua mayor productividad marginal del agua, y viceversa, como se observa en la siguiente gráfica:

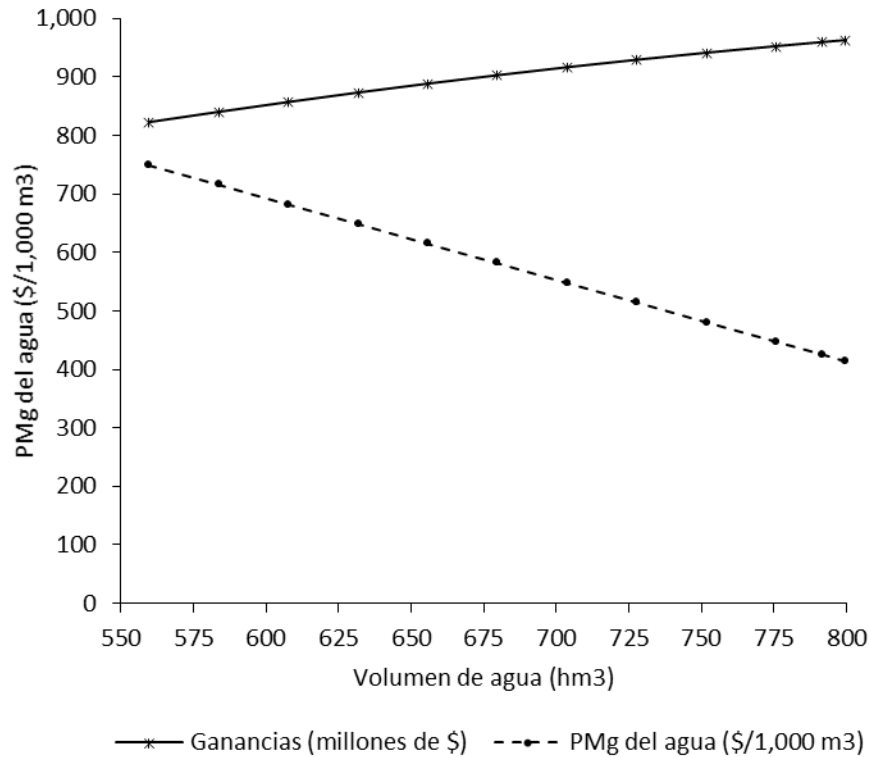


Figura 1. Productividad marginal del agua.

Fuente: Elaborado con los datos del cuadro 3.

La cuota de riego que pagan los agricultores en la Región Lagunera de \$1,600 por hectárea. Si se considera que el volumen promedio de agua de los principales cultivos de la región es de 18,625 m³ por ha. y si se toma en cuenta que la productividad marginal del agua de gravedad es de \$0.414 m³, entonces la cuota eficiente sería de \$7,719 por hectárea. Este resultado demuestra que la cuota que pagan los productores agrícolas de La Laguna es considerablemente inferior a la cuota eficiente obtenida con el modelo aquí estimado.

Discusión o Conclusiones

La cuota que pagan por el agua los productores agrícolas de la Comarca Lagunera es menor que la productividad marginal del agua, lo cual indica que no refleja el costo de oportunidad o precio sombra del agua en esa región. Con el fin de introducir eficiencia en la economía regional e inducir mayores ganancias y mejoría del bienestar de sus pobladores, se recomienda cobrar por el agua una cuota acorde con su costo de oportunidad.

El patrón de cultivos se debe de enfocar en la producción de aquellos cultivos con alto precio. Por lo que los cultivos forrajeros no lograrían cubrir el costo de oportunidad estimado ya que son de bajo precio y se requiere de mucha agua para su producción.

Agradecimientos

A la Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Delegación Región Lagunera, a la Comisión Nacional del Agua y al Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera (CENID RASPA), por la aportación de datos estadísticos para la realización de la presente investigación.

Referencias

- CONAGUA. (2016). Comisión Nacional del Agua. Atlas del agua en México 2016. México, D.F. 137 p.
- CONAGUA. (2017). Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México. 294 p.
http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2017.pdf
- CONAGUA e IMTA. (2016). Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. México, D.F. <http://www.edistritos.com/DR/estadisticaHidrometrica/distrito.php>
- CONAGUA. (2017). Comisión Nacional del Agua. Informe de distribución de aguas del distrito de riego 017 Región Lagunera ciclo agrícola 2015-2016. México, D.F. 10 p.
- FAO. (2013). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. FAO Informe sobre temas hídricos No. 38. 78 p.
- González, D. (2016). La Laguna destaca en producción agrícola. El Siglo de Torreón, México. 7 de julio. <https://www.elsiglodetorreon.com.mx/noticia/1241023.la-laguna-destaca-en-produccion-agricola.html>
- GWP. (2012). Global Water Partnership. Agua en la economía verde. 16p.

https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/del-tec/agua-en-la-economia-verde.pdf

- Hill R. Carter, Griffiths William E. and Lim Guay C. (2011). Principles of Econometrics. (4 ed.) Wiley. United States of America. 784 p.
- HLPE. (2015). Grupo de Alto Nivel de Expertos. Contribución del agua a la seguridad alimentaria y nutrición. Un informe del Grupo de alto nivel de expertos en seguridad alimentaria y nutrición. Roma. 154 p. <http://www.fao.org/3/av045s.pdf>
- ICWE. (1992). International Conference on Water and the Environment. The Dublin statement and report of the conference. Geneva: World Meteorological Organization. Dublin, Ireland. 67 p.
- Kahil M.T., A.Dinar and J. Albiac. (2015). Modeling water scarcity and droughts for policy adaptation to climate change in arid and semiarid regions. Journal of Hydrology 522:95-109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.042>
- Lall S. and H. Wang. (1999). Valuing Water for Chinese Industries: A Marginal Productivity. The World Bank. 28 p. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-2236>
- Macías, R. H., C.I. Sánchez y V.E. Catalán. (2007). Sistema de Soporte de Decisiones para el Manejo Integral del Agua en el DR017, Coahuila y Durango, México. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas, VI (1): 77-89
- Medellín A.J., J.J. Harau and R.E. Howitt. (2010). Estimating economic value of agricultural water under changing conditions and the effects of spatial aggregation. Science of the Total Environment 408:5639-5648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.013>
- Ojeda, B.W., E. Sifuentes I., A. Rojano A. y M. Iñiguez C. (2012). Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. 65-113 In: Martínez A.P.F. y c. Patiño G. Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México: volumen IV: adaptación al cambio climático. Jiutepec, Morelos, México. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 120p. <http://hdl.handle.net/20.500.12013/1110>
- Ríos, F. J. L., M. M. Torres, F.R. Castro, M.M.A. Torres, y T.J. Ruiz. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017,

- Comarca Lagunera, México. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo, 47(1):93-107
- SAGARPA-DRL. (2016). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación-Delegación Región Lagunera. Avances de siembras y cosechas, en la Región Lagunera 2011-2016. Cd. Lerdo, Durango, México.
- Samarawickrema, A. and Kulshreshtha, S. (2009). Marginal Value of Irrigation Water Use in the South Saskatchewan River Basin, Canada. Great Plains Research, 19(1): 73-88.
- Shen X. and B. Lin. (2017). The shadow prices and demand elasticities of agricultural water in China: A StoNED-based analysis. Resources, Conservation and Recycling, Vol 127: 21-28. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.010>
- Valdivia A.R., J. Hernández O., R. Monroy H., J.E. Rubiños P., M. Reyes R. y D. Amaya P. (2011). Valoración económica del agua en el sector industrial. Terra Latinoamericana, 29 (4):459-466.
- Vargas A. (2017). Problemática del agua en la Comarca Lagunera. Milenio 24 de octubre. <http://www.milenio.com/estados/problematika-del-agua-en-la-comarca-lagunera>
- Ward, F. and A. Michelsen. (2002). The economic value of water in agriculture: concepts and policy applications. Water Polity 4: 423-446.
- WWAP. (2016). Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. París, UNESCO. 148p.
- WWDR. (2018). Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Cifras y datos. 12p.
- Young, R.A. and J.B. Loomis. (2014). Determining the economic value of water: concepts and methods. (2 ed.). Resources for the Future Press. Washington, D.C. 358 p.
- Ziolkowska, J.R. (2015). Shadow price of water for irrigation—A case of the High Plains, Agricultural Water Management, Agricultural Water Management, 153(1):20-31. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.024>.

7. APÉNDICES

7.1 Apéndice 1. Ganancia de los cultivos de la modalidad riego por bombeo, 2015-2016

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego m³	Volumen total m³	Precio \$/ton	Rendimiento (ton/ha)	Ingreso \$/ha	Costos de producción* \$/ha*	Ganancia \$/ha	Ganancia N \$
Alfalfa	34,034.20	10,751.00	365,901,684.20	364.425	85	30,976.13	13,698.14	17,277.98	588042377.02
Avena forrajera	16,888.20	9,843.00	166,230,552.60	340.13	45	15,305.85	9,901.02	5,404.83	91277874.92
Algodón:									
Algodón pluma	653.8	11,300.00	7,387,940.00	***USD\$0.64/LIB	1.8**	46,984.44	17,377.08	41,754.85	27299322.53
Algodón semilla				4,859	2.5**	12,147.50			
Sorgo forrajero	3,978.50	10,010.00	39,824,785.00	437.31	50.0	21,865.50	13,587.60	8,277.90	32933639.84
Maíz Forrajero	32,679.16	9,910.00	323,850,475.60	485.9	45.0	21,865.50	9,861.74	12,003.76	392272759.94
Melón	4,058.80	9,042.00	36,699,669.60	2,137.96	30.0	64,138.80	18,017.40	46,121.40	187197524.75
Sandía	244	9,142.00	2,230,648.00	1,068.98	40.0	42,759.20	13,908.81	28,850.39	7039495.87
Tomate	969.45	9,431.00	9,142,882.95	2,915.40	25.0	72,885.00	12,773.21	60,111.79	58275372.96
Chile	340.88	8,812.00	3,003,834.56	2,915.40	18.0	52,477.20	17,559.42	34,917.78	11902772.06
Maíz Grano	178	9,950.00	1,771,100.00	4,373.10	4.5	19,678.95	13,648.84	6,030.11	1073359.71
Sorgo Escobero	64	11,718.00	749,952.00	4,373.10	5.0	21,865.50	13,972.45	7,893.05	505155.18
Nuez	4,301.75	14,316.00	61,583,853.00	38,872.00	1.5	58,308.00	17,743.24	40,564.76	174499466.65

* costos estimados, las cifras pueden variar, no contempla el concepto de renta de tierra y agua., riegos, costos diversos y coberturas.

**Rendimiento algodón 4.5 ton/ha del cual 36% es algodón pluma y el 50% semilla

***Tipo de cambio 18.50

7.2 Apéndice 2. Ganancia de los cultivos de la modalidad riego por gravedad, 2015-2016.

Cultivo	Superficie (ha)	Lámina de riego m ³	Volumen total m ³	Precio \$/ton	Rendimiento (ton/ha)	Ingreso \$/ha	Costos de producción* \$/ha*	Ganancia \$/ha	Ganancia N \$
Alfalfa	5,593.86	11,778	65,884,483.08	364.425	70	25,509.75	12,204.06	13,305.69	74430174.00
Avena forrajera	413	16,238	6,706,294.00	340.13	35	11,904.55	8,809.37	3,095.18	1278310.58
Algodón:									
Algodón pluma		16,328		***USD\$0.64/LIB	1.6**	42,285.99			
Algodón semilla	10,298.42		168,152,601.76	4,859.00	2.3**	10,932.75	16,211.57	37,007.17	381115421.69
Sorgo forrajero	2,278.86	17,228	39,260,200.08	437.31	45.0	19,678.95	12,216.59	7,462.36	17005666.42
Maíz Forrajero	17,027.56	16,464	280,341,747.84	485.9	40.0	19,436.00	8,904.97	10,531.03	179317675.37
Melón	958.1	23,624	22,634,154.40	1,943.60	25.0	48,590.00	17,720.68	30,869.32	29575899.50
Sandía	469.72	23,264	10,927,566.08	1,068.98	35.0	37,414.30	13,204.53	24,209.77	11371814.64
Tomate	7	26,551	185,857.00	2,915.40	20.0	58,308.00	11,814.85	46,493.15	325452.03
Chile	550.12	16,037	8,822,274.44	2,915.40	14.0	40,815.60	16,701.55	24,114.05	13265621.65
Maíz Grano	1,767.00	11,119	19,647,273.00	4,373.10	4.0	17,492.40	12,361.30	5,131.10	9066660.77
Sorgo Escobero	492.52	28,461.00	14,017,611.72	4,373.10	4.0	17,492.40	12,276.75	5,215.65	2568812.23
Nuez	4,899.65	16,408.00	80,393,457.20	38,872.00	1.5	58,308.00	16,671.23	41,636.77	204005605.03

* costos estimados, las cifras pueden variar, no contempla el concepto de renta de tierra y agua., riegos, costos diversos y coberturas.

**Rendimiento algodón 4.5 ton/ha del cual 36% es algodón pluma y el 50% semilla

***Tipo de cambio 18.50