

DOI: 10.24850/j-tyca-13-05-09

Artículos

Precio sombra y costo real del agua para riego en Acámbaro, Guanajuato

Shadow price and real cost of water for irrigation in Acámbaro, Guanajuato

Juan Trujillo-Murillo¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9962-9017>

Arturo Perales-Salvador², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7225-4574>

¹Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México,
juan_trujillo1989@hotmail.com

²Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México, México,
adelin21@hotmail.com

Autor para correspondencia: Juan Trujillo-Murillo,
juan_trujillo1989@hotmail.com



Resumen

El conocimiento real, completo y suficiente de la situación actual del agua en México es necesario para generar políticas que deriven en acciones concretas para afrontar la problemática del agua en el país. Determinar el valor real del agua contribuye a crear soluciones directas, focalizadas y objetivas, para lo cual se estimó el valor del agua para riego mediante dos metodologías: la contabilidad de costos y la programación matemática, con el objetivo de calcular el valor real del agua en la zona de estudio. La contabilidad de costos contempla el total de los costos en los que se incurre para la obtención del agua para riego y calcula su valor como la sumatoria de los costos. La programación matemática considera el agua como factor productivo y establece el valor del agua como el precio sombra del factor a partir de los coeficientes técnicos de producción. El costo total del agua, que es desde esta óptica el valor real del agua, estimado con la primera metodología fue de \$1.03 m³. La programación matemática arrojó para el precio sombra del agua un valor de \$0.95 m³.

Palabras clave: precio sombra, valor real del agua, programación matemática.

Abstract

The real, complete, and sufficient knowledge of the current water situation in Mexico is necessary to generate policies that lead to concrete actions to address the water problem in the country. Determine the real value of water contributes to create direct, focused, and objective solutions, for which the value of water for irrigation was estimated through two methodologies, cost accounting and mathematical programming, to calculate the real value of water in the study area. The cost accounting considers the total of the costs incurred to obtain the water for irrigation and calculates its value as the sum of the costs. Mathematical programming considers water as a productive factor and establishes the value of water as the shadow price of the factor based on the technical coefficients of production. The total cost of water, which is from this perspective the real value of water, estimated with the first methodology was \$ 1.03 m³. The mathematical programming showed a value of \$ 0.95 m³ for the water shadow price.

Keywords: Shadow price, real water value, mathematical programming.

Recibido: 03/05/2019

Aceptado: 12/08/2021

Introducción

A nivel mundial existe un consenso respecto al grado de existencia, disponibilidad, ubicación y consumo del agua, el Consejo Mundial del Agua afirma que el 97.5 % del agua en el planeta es salada; el 2.5 % es agua dulce, de ésta, el 69.7 % es agua congelada; 30 % es subterránea; y 0.3 % es superficial (2 % en los ríos, 11 % pantanos y 87 % lagos). Mundialmente, se extraen 3 600 km³ de agua dulce, 1 600 litros/hab-día, de la cual el 75 % se destina a la agricultura, el 25 % a la industria y el 10 % a consumo doméstico (WWC, 2015).

Desde esta óptica, la orientación agrícola del estudio obedece a la importancia relativa del sector primario en el uso del agua y a la elevada dependencia del agua para la producción, puesto que como se sugiere en Torres *et al.* (2013), el sector primario es el de mayor demanda del recurso; más aún, en México, algunas zonas agrícolas del país poseen una elasticidad precio igual a ocho, es decir, un aumento del 8 % en el precio reduce en 1 % la demanda de agua, por lo que el precio podría ser una herramienta útil en el control de la demanda, sin embargo, la ausencia de parámetros que indiquen el valor del agua causa que los precios sean

bajos para el agua consumida en este sector, lo cual es el factor principal en contra de la eficiencia de este instrumento como medio de control de su demanda. Así, como la demanda del agua sólo empieza a reducirse cuando los precios son bastante elevados, resulta que la disponibilidad del recurso es una limitación aún mayor que su precio (Alcón, Fernández, & Miguel, 2007).

En este sentido, es indispensable la aplicación de metodologías que permitan determinar el valor real del agua en cada región, pues su cálculo permite emprender acciones concretas con mayor eficiencia encaminadas a resolver la problemática del agua, ya que eliminan los aspectos subjetivos y errores típicos de otras metodologías comúnmente usadas, como el establecimiento de tarifas diferenciadas, estratificadas o dirigidas.

De acuerdo con Briseño (2018), las tarifas únicas se cobran sin considerar el estrato económico; las tarifas diferenciadas enfrentan la dificultad para identificar a los diferentes tipos de usuarios, y al facilitar una tarifa más alta, se descuida la eficiencia; siguiendo esta idea, en México, un sistema tarifario se dificulta si se considera que en el país los precios de mercado no cubren los costos reales del agua, por lo que los gobiernos deben subsidiar el precio; cómo se expone en Chalas, Ramírez, Méndez y Bello (2020), en los sistemas de riego, la tarifa por superficie no asegura los costos.

Por lo tanto, el valor real del agua debe ser estimado mediante metodologías que contemplen el total de los costos en los que se incurre para la obtención del agua. Torres *et al.* (2013) proponen que el precio del agua para riego agrícola debe cubrir los costos anuales de conservación, conducción, distribución, mantenimiento de la infraestructura, operación del distrito de riego y módulo de riego, el incremento en la inflación y considerar los subsidios.

Desde esta óptica, la utilización de la metodología de contabilidad de costos se propone en este estudio como un determinante eficaz, sólido, completo y objetivo para establecer el valor real del agua. La teoría objetiva del valor postula que el valor de un bien está designado por los costos en que se incurre para crearlo y ofrecerlo en el mercado más una ganancia media que define el beneficio del capital invertido. En John John (1994) se expone que el costo total de producción está conformado por el monto de los costos fijos totales (explícitos e implícitos) más los costos variables totales (precio de los insumos).

Es complejo enunciar una definición global de los costos, pues como menciona Reyes (2008), el término costo tiene varias acepciones, pero desde el punto de vista económico alude a los recursos que se invierten para obtener un bien (costo de inversión), incluyendo los recursos humanos y el tiempo, los cuales deben ser medidos en valores de moneda, por lo que también toman el nombre de costos monetarios.

En economía, generalmente se describen los costos en relación con los factores de producción, es decir, el capital, la mano de obra, la tierra y el tiempo. Este método consiste en hacer un análisis completo de todos los factores que intervienen en el proceso y generar un registro de los costos en los que se incurre para la obtención del total de los elementos involucrados en cada etapa del proceso.

Sin embargo, el método de valoración utilizado para estimar el valor del agua condiciona el proceso de aplicación del método científico, pues las diferentes metodologías adoptan posturas teóricas y marcos conceptuales que representan una visión subjetiva, por lo que los resultados obtenidos difieren de un estudio a otro dependiendo de la metodología utilizada. Ante esta situación, se propone el uso de una metodología adicional que incremente la posibilidad de analizar el fenómeno desde una perspectiva diferente y permita contrastar ambos resultados.

Una característica que complementa el análisis de la contabilidad de costos es incluir el concepto de eficiencia a través de la productividad de los factores, pues cómo se expresa en Fernández-Zamudio, Alcón y Miguel (2007), la implementación de nuevas tecnologías aumenta la eficiencia de los procesos y permite optimizarlos reduciendo el costo de oportunidad y, por ende, minimizando el precio sombra, puesto que el precio sombra mantiene una relación negativa con la cantidad total de uso del agua, debido a que el valor de un insumo depende del grado de utilización y

disponibilidad, y en el caso del agua para riego agrícola, la disminución de su uso provoca que la productividad de cada m^3 sea muy elevada.

En este sentido, se propone usar la programación matemática que permite analizar la eficiencia de los factores productivos mediante el cálculo de su precio sombra. La metodología de la programación matemática aplicada al agua de riego como insumo productivo permite estimar el valor que aporta el agua al valor del producto final mediante el costo de oportunidad de su uso en el proceso de producción. Este costo de oportunidad se calcula como el precio sombra del recurso agua considerando el valor del resto de los insumos y factores productivos.

El objetivo principal de la investigación consiste en estimar el valor real del agua para riego agrícola en la región de Acámbaro en Guanajuato, México, mediante las metodologías de contabilidad de costos y programación matemática, así como contrastar los resultados de las metodologías de valoración, comparando sus resultados mediante el análisis económico, bajo la hipótesis de que el valor real del agua en la zona de estudio es superior al precio de mercado actual, y que los resultados de las metodologías varían debido a que utilizan diferentes posturas teóricas y marcos conceptuales.

Metodología

El valor asignado para los bienes que no poseen un mercado, como los recursos naturales, y el agua de ríos, mares y presas están contruidos con base en el concepto del valor económico total (VET). El valor económico total de un bien ambiental se conforma por su valor de uso (VU) y su valor de no uso (VNO), es decir:

$$VET = VU + VNO$$

El valor de uso de un bien ambiental es el valor que se le asigna mediante las leyes de oferta y demanda del mercado. Este valor de uso se subdivide a su vez en valor de uso directo (VUD), valor de uso indirecto (VUI) y valor de opción (VO). El VUD es el valor que se le asigna al bien debido al uso por el cual se intercambia en el mercado y es el que determina su precio comercial. Por su parte, el VUI es el valor que tiene un bien ambiental por estar relacionado o formar parte de alguna actividad económica de manera indirecta. El valor de opción considera el valor que guarda un bien de manera intrínseca si no es utilizado en la época actual para poder utilizarse en un futuro.

El valor de no uso (VNU) o uso pasivo se expone claramente por Lomas *et al.* (2005), donde se afirma que se determina cuando no existe precio de mercado para el bien y se manifiesta cuando se decide no modificar un elemento natural; declaran que sentiría una pérdida si este componente desapareciera; el (VNU) se divide en valor de legado (VL), que es el valor de legar los beneficios del recurso a las generaciones futuras, y valor de existencia (VE), definido como el valor que los individuos atribuyen a bienes ambientales por el simple hecho de que existan, incluso si los individuos no realizan ningún uso activo o no reciben ningún beneficio directo o indirecto de ellos.

Así, la fórmula extendida del VET es:

$$VET = VUD + VUI + VO + VL + VE$$

Desde esta óptica, los métodos de valoración se pueden agrupar en aquellos que consideran los valores de uso y los valores de no uso. Con base en lo expuesto en Lomas *et al.* (2005), los métodos de valoración de bienes sin mercado se dividen en aquellos que evalúan los valores de uso y los que consideran los de no uso. Dentro de las metodologías que se basan en los valores de uso se encuentran las de valor de uso directo de bienes, como el análisis de mercado, la programación matemática, la contabilidad de costos y la valoración contingente; y las de servicios,

como la de costo de viaje y precios hedónicos. Las metodologías de uso indirecto para servicios son la contabilidad de costos y la valoración contingente. El valor de opción de los bienes y servicios se estima por lo general a través de la valoración contingente. Finalmente, la estimación del valor de no uso, como es el valor de existencia de bienes y servicios, suele realizarse mediante la valoración contingente.

La valoración económica del agua, dada la naturaleza del caso, se llevó a cabo mediante dos metodologías: la contabilidad de costos y la programación matemática.

Contabilidad de costos

La primera se basa en la llamada teoría objetiva del valor, donde el costo total de un bien determina el valor real del mismo; en tal sentido, esta metodología consiste en el registro de todos los costos en los que se incurre para la obtención del bien desde su localización natural hasta el punto geográfico en que se utiliza.

Desde esta óptica, la sumatoria de todos los costos individuales generados para la obtención del objeto de estudio dividida entre la

cantidad del bien obtenida resulta en el valor por unidad. El método de contabilidad de costos forma parte de la microeconomía y, como rama de la ciencia económica, se desprende de la teoría del valor. Desde la óptica microeconómica, el valor de un bien se estima contabilizando los costos originados en la producción de éste.

La actualización de los valores monetarios consiste esencialmente en la aplicación del principio de valor futuro, considerando la fórmula básica:

$$[VF_n = C * (1 + r)^n]$$

Entendiéndose como el valor actual del monto inicial de inversión más el valor actual de los montos, con una tasa de interés real promedio base. Considerar la tasa promedio de interés real anualizada permite hacer una aproximación que represente la realidad de la evolución de este parámetro, generando un buen indicador al ser utilizado en los cálculos metodológicos del presente estudio.

La metodología de contabilidad de costos consiste en contabilizar los costos globales en los que se incurre para la obtención del bien, actualizándolos a valor presente, considerando una tasa promedio de interés, y sumándolos a los costos actuales. Los valores necesarios para la aplicación de la metodología deben incluir todos los conceptos posibles,

partiendo de la premisa de que a un mayor número de elementos considerados en el cálculo de los costos corresponderá una más exacta aproximación al valor real del bien y la frecuencia con que se realizan los desembolsos (F). Se propone el uso de un cuadro de registro como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Costos relacionados con la construcción de presas.

Concepto	Monto (\$)	Frecuencia
Compensación	M1	F1
Construcción	M2	F2
Mantenimiento	M3	F3
Administración	M4	F4
Total	M5	

Los montos (M) usualmente son expresados en una moneda de referencia sin tasa de actualización. Cuando se evalúan infraestructuras se incluye el concepto de compensación, el cual se refiere al pago de los poseedores de las tierras donde se levantó la obra, a manera de indemnización por la expropiación de sus propiedades. En la construcción se contempla el monto total de inversión realizada y, aunque la aportación no se presente en una sola exhibición, se registra como un desembolso

único. La cantidad incluye los costos de inversión previa desde la formulación del proyecto, los materiales utilizados, las nóminas, maquinaria y equipo utilizados, etcétera. Cuando el registro de cada elemento no se desglosa, es posible usar el costo total final de construcción.

Considerando el periodo de construcción desde su inicio hasta su culminación, el total de años transcurridos en dicho periodo y el monto se capitaliza bajo el supuesto de una tasa de interés fija constante a lo largo de todo el periodo.

Programación matemática

La segunda metodología, la programación matemática, parte de la construcción de un cuadro instrumental que permita generar el modelo matemático que represente el problema de optimización.

La justificación teórica de la aplicación de un modelo de programación lineal responde a la presentación de éste como un problema de maximización (primal), cuyas condiciones de convexidad deben cumplirse para la formulación final de la ecuación. Como se sugiere en

Ilak, Rajšl, Krajcar y Delimar (2015), deben cumplirse las condiciones de convexidad para asegurar la dualidad.

Desde esta óptica, en Lange (2006), citado por Ziolkowska (2015), se expone que el problema se formula como un problema de programación lineal de maximización de beneficios al proporcionar valoraciones de los bienes analizados con base en la idea de que una empresa que maximiza las ganancias utilizará el bien hasta el nivel en el que el ingreso neto obtenido de una unidad adicional sea igual al costo marginal de obtenerlo. Más aun, en Young y Loomis (2014) se afirma que esta valoración utiliza dos supuestos: que los agentes económicos optimizan su producción con pleno conocimiento de los precios de mercado y que éste maximiza beneficios en el punto en que el producto marginal de los insumos es igual a su precio.

Así, bajo un contexto en el que los precios de mercado no son óptimos, el empleo de la programación matemática propone la estimación de un conjunto de valores que fungan como los precios, en aras de generar la asignación económica de equilibrio. A partir de este argumento se puede derivar el supuesto de que tales precios, denominados precios sombra, consideran los costos reales, los costos de oportunidad, las distorsiones de mercado, y demás fenómenos económicos que provocan la divergencia entre el valor real y el precio de mercado.

Los valores usados corresponden a los precios netos de los productos generados mediante la utilización del bien en estudio, y a los

principales factores de producción, así como a los coeficientes técnicos para cada tipo de producto. Por lo general, los cuadros instrumentales van acompañados por el cuadro de restricciones, es decir, el conjunto de recursos de los que se dispone y que limitan los niveles de producción.

La solución se obtiene mediante la resolución del siguiente problema:

$$\text{Max } P_1X_1 + p_2 X_2 + \dots P_nX_n$$

Sujeto a:

$$(F1) X_1 + X_2 + \dots + X_n \leq K_1$$

$$(F2) X_1 + X_2 + \dots + X_n \leq K_2$$

$$(Fn) X_1 + X_2 + \dots + X_n \leq K_n$$

Donde:

P : representa el precio del factor productivo.

X : representa la cantidad utilizada del factor productivo.

K : representa la cantidad disponible del factor productivo.

A partir del problema de optimización se obtiene una solución que representa la combinación de insumos y producción que garantiza la máxima ganancia. Aunado a esto se obtienen los costos reducidos de cada unidad de producto y los precios sombra de los recursos.

El concepto de los costos reducidos se define como la cantidad en que disminuye el valor total de la solución obtenida, bajo el supuesto de que se forzaría al modelo propuesto a incluir una variable de producción, la cual no estuviese contemplada en la solución óptima. Es decir, si la combinación óptima de insumos que produce la máxima ganancia posible dados los recursos disponibles resulta ser una combinación de X_1 y X_2 que no considera el cultivo de X_3 , y por alguna razón externa o ajena al proceso de optimización se requiriese producir una unidad del cultivo X_3 , la ganancia se reduciría en la cantidad que representa el costo reducido de la actividad X_3 . De igual manera se define que los coeficientes técnicos son la cantidad de cada uno de los insumos que se requieren en el proceso productivo para producir una unidad de producto.

Es preciso mencionar que las restricciones para la producción no son exclusivamente de índole productivo o de optimización; en la mayoría de los casos existen restricciones de otra naturaleza ajenas a los procesos productivos y su optimización, como las restricciones de mercado (cuotas,

demanda, leyes, regulaciones, etc.), restricciones sociales (autoconsumo o morales) y restricciones técnicas.

Resultados y discusión

Resultados de la contabilidad de costos

El cálculo de los montos incorporados a la valoración total de costos relacionados con el agua de la presa Solís se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Costos relacionados con la presa Solís.

Concepto	Monto (\$)	Frecuencia
Compensación	1 000 000	Único
Construcción	100 000 000	Único

Mantenimiento	500 000	Anual
Administración	200 000	Mensual
Total	101 700 000	

Fuente: elaboración propia con base en Conagua (2020) y Semarnat (2020).

Siguiendo a Banxico (2014), la tasa de interés promedio real fue calculada con base en los promedios reales de la tasa de interés de los últimos 20 años, resultando en un 5 %. La compensación se definió de manera individual para cada uno de los propietarios bajo el concepto de erogación compensatoria. El mantenimiento se refiere a los gastos en los que se incurre para conservar en buenas condiciones la infraestructura de la construcción.

Considerando una inversión de 1949 a 2019, a la fecha son 70 años de la construcción de la presa Solís; se utilizó un periodo de capitalización de $N = 70$ con una tasa de interés fija constante.

El registro de costos generó el cuadro de contabilidad de costos que integra aritméticamente la suma del total de costos necesarios para el aprovisionamiento de agua en la zona, como se presenta en la Tabla 3.

Tabla 3. Costos de la presa Solís capitalizados.

Concepto	Monto (\$)	Tasa de descuento * (%)	Años de capitalización	VFn (\$)
Compensación	1 000 000	5	70	30 426 420
Construcción	100 000 000	5	70	3 042 642 554
Mantenimiento	500 000	5	70	15 213 212
Administración	200 000	5	70	6 085 285
Total	101 700 000			3 094 367 477

*Tasa de interés real promedio estimada en México en los últimos 20 años.

Fuente: elaboración propia con base en Banxico (2014), Conagua (2020) y Semarnat (2020).

Desde esta óptica, el valor real de la inversión en la presa en la actualidad asciende a \$3 094 367 477. Siguiendo la postura teórica de la metodología de contabilidad de costos (bajo la consideración que la función primordial de la presa es la disposición de agua), se puede deducir que el valor del agua de la presa Solís se calcula dividiendo el valor real de la presa entre la cantidad de agua obtenida de la presa. En este sentido, el valor del agua se obtiene mediante la fórmula:

$$V_A = V_P P / Q_A$$

Donde:

V_A : valor del agua de la presa por unidad (\$/m³).

V_P : valor real de la presa en la actualidad (\$).

Q_A : cantidad total de agua obtenida a partir de la presa (m³).

La consideración obvia en el caso de la presa Solís es que el valor total fue calculado para 2019, utilizando un periodo de 70 años de funcionamiento; pero la vida útil de la presa Solís es de 150 años, por lo que el valor total de la presa debiera ser estimado con una capitalización de $n = 150$.

Sin embargo, el cálculo del valor del agua requiere los niveles de obtención de líquido totales de la presa en el periodo completo, y ya que los niveles de extracción del agua no son constantes y además a la vida útil de la presa aún le restan 40 años, lo propio es anualizar tanto el valor real de la presa como los niveles de extracción, y/o tomar un año base utilizando valores promedio, para así obtener el valor real anualizado del agua de la presa Solís (Tabla 4).

Tabla 4. Valor del agua de la presa Solís.

Valor anual de la presa (\$)	Cantidad anual de agua (m ³)	Valor del agua (\$/m ³)
3 094 367 477	2 982 000 000	1.037

Fuente: elaboración propia.

Por lo tanto, una vez hecha esta observación, y considerando lo expuesto en Conagua (2019), el promedio anual de obtención de agua es de 2 982 000 000 m³ y el valor real del agua de la presa Solís es de \$1.03/m³.

Resultados de la programación matemática

Para contrastar los resultados de la metodología directa de contabilidad de costos y la metodología indirecta de valoración contingente, se generó un modelo de programación lineal matemática que permitió determinar el precio sombra del agua en la zona de estudio a partir de la productividad marginal del recurso.

Investigaciones previas han establecido diferentes modelos aplicando la metodología de programación matemática a casos de estudio para fijar el precio sombra del agua, como el de Exebio, Palacios, Mejía y Santos (2009), en el cual al procesar los registros de los costos del agua mediante un modelo de programación lineal se obtiene un precio sombra del agua de \$0.43 m³; el de Molinos y Guzmán (2018), que expone una estimación del precio sombra del CO₂ para las plantas de tratamiento de agua potable, concluyendo que el precio sombra medio del CO₂ es el 5.7% del precio del agua potable; congruente con su trabajo previo, Molinos, Hanley y Sala (2015) estimaron el precio sombra a través de un enfoque de función de distancia direccional.

Los valores utilizados en este modelo se desprenden de FIRA (2019), donde se exponen los patrones de cultivo en la zona de estudio, principalmente maíz, cebada y sorgo, con precios netos \$3 960 /ton, \$4 300/ton y \$4 150/ton, respectivamente.

En el estado de Guanajuato, los principales factores de producción son tierra, capital y agua. Para el caso del maíz, por cada hectárea de cultivo se requiere una inversión de \$38 228.00, 6 000 m³ de agua y 12 jornales. Para el caso de la cebada, por cada hectárea de cultivo se requiere una inversión de \$28 876.00, 4 500 m³ de agua y 10 jornales. En cuanto al sorgo, una hectárea de cultivo requiere una inversión de \$29 021.00, 7 000 m³ de agua y 10 jornales (FIRA, 2019).

Los coeficientes técnicos para cada tipo de cultivo se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes técnicos de producción para los principales cultivos en Acámbaro, Guanajuato.

Cultivo	Precio Neto (\$/ton)	Coeficientes técnicos			
		Tierra	Capital (\$ha)	Agua (m ³ /ha)	Trabajo (jornal/ha)
Maíz	3 960	1	38 228	6 000	12
Cebada	4 300	1	28 876	4 500	10
Sorgo	4 150	1	29 021	7 000	10

Fuente: elaboración propia con datos de FIRA (2019).

Generalmente los cuadros instrumentales van acompañados por el cuadro de restricciones, es decir, el conjunto de recursos de los que se dispone y que limitan los niveles de producción.

Siguiendo a Domínguez (2014), de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua, la presa Solís impulsará los cultivos en los 11 módulos de riego del Distrito de Riego 087. Los volúmenes que utilizarán los distritos mencionados ascienden a 274.5 millones de m³, que beneficiarán

aproximadamente a 15 mil productores agrícolas y a una superficie de 47 698 hectáreas para 1.5 riegos (Tabla 6).

Tabla 6. Disponibilidad de factores productivos.

Producto	Tierra (ha)	Capital (\$)	Agua (m ³) **	Trabajo
Total	47 698	96 125	274 500 000	1 534

*Disponibilidad completa.

** Agua disponible para los cultivos principales en Acámbaro.

Fuente: elaboración propia con datos de Domínguez (2014) y FIRA (2019).

Para formular el problema de optimización se utiliza el enfoque dual, minimización de costos (términos monetarios), bajo la premisa de que el enfoque primal, maximización de ganancias (términos monetarios), se corresponde al mismo nivel de uso de factores de producción. Desde esta óptica, las variables de optimización se derivan de la maximización de las ganancias que se obtienen de producir las cantidades óptimas, en toneladas, de los cultivos (maíz, cebada y sorgo), multiplicadas por su precio neto de mercado, sujetas a las restricciones de disponibilidad de los factores de producción: tierra (hectáreas), agua (metros cúbicos), trabajo (jornales) y capital, con base en sus coeficientes técnicos.

La solución se obtiene mediante la resolución del siguiente problema:

$$\text{Max } 3\,960 \text{ maíz} + 4\,150 \text{ cebada} + 4\,300 \text{ sorgo}$$

Sujeto a:

$$(\text{Tierra}) \text{ maíz} + \text{cebada} + \text{sorgo} \leq 47\,698$$

$$(\text{Agua}) 6\,000 \text{ maíz} + 4\,500 \text{ cebada} + 7\,000 \text{ sorgo} \leq 274\,500\,000$$

$$(\text{Trabajo}) 12 \text{ maíz} + 10 \text{ cebada} + 10 \text{ sorgo} \leq 1\,534$$

Donde:

Maíz (tierra), cebada (tierra), sorgo (tierra) representa la cantidad de "tierra" en hectáreas dedicadas a la producción de cada cultivo.

Maíz (agua), cebada (agua), sorgo (agua) representa la cantidad de "agua" en metros cúbicos dedicados a la producción de cada cultivo.

Maíz (trabajo), cebada (trabajo), sorgo (trabajo) representa la cantidad de “trabajo” en jornaleros dedicados a la producción de cada cultivo.

De igual manera se define que los coeficientes técnicos son la cantidad de cada uno de los insumos que se requieren en el proceso productivo para producir una unidad de producto. Es decir, la cantidad de agua, tierra, horas máquina y capital que se necesitan para producir una unidad de cultivo (la unidad puede entenderse como hectárea o tonelada).

En ese sentido, el valor del agua en una región puede estimarse a través de su precio sombra generado en el proceso productivo de los cultivos en que se utiliza como insumo; esto permite valorar bajo una concepción económica de optimización el agua para riego utilizada en los cultivos considerando sus usos alternativos, su costo en la región y la disponibilidad que existe, para así poder tomar decisiones acerca de su uso que supongan una utilización adecuada y que incida en el beneficio económico de los productores (Tabla 7).

Tabla 7. Valores críticos del modelo.

Variable	Valor	Costo reducido
Maíz	20	0

Cebada	34	0
Sorgo	0	2 500

Fuente: elaboración propia.

La programación matemática utiliza las variables X_1 , X_2 y X_3 como valor alfanumérico para maíz, trigo y sorgo, respectivamente; el problema resuelto por medio del programa *LINDO* 6.1 arroja los resultados que se observan en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores críticos de los factores.

Factor	Faltantes/sobrantes	Dual price
Tierra	47 600	0
Agua	0	0.95
Trabajo	950	-1 700

El precio sombra del agua a partir de los resultados generados por el programa es de 0.95. Desde esta óptica se puede indicar que el valor real del agua es de \$0.95/m³.

Si se considera el análisis de sensibilidad, los valores se aprecian en la Tabla 9.

Tabla 9. Análisis de sensibilidad.

Variable	Coeficiente	Incremento permitido	Decremento permitido
Maíz	3 960	Infinito	Infinito
Cebada	4 300	Infinito	1 664
Sorgo	4 100	Infinito	Infinito

Fuente: elaboración propia.

El nivel de producción óptimo permite un incremento infinito de precio neto; esto es acorde con la ley de oferta que enuncia que a mayor precio mayor nivel de producción. Por el contrario, el modelo permite una reducción limitada de precios por tonelada sin que la solución básica cambie. La disponibilidad de factores determina los valores de la función objetivo; en este sentido, la dependencia del nivel de producción al agua, tierra y trabajo permiten medir la importancia de los factores productivos en el proceso productivo y en las decisiones de producción (Tabla 10).

Tabla 10. Rangos de disponibilidad de factores.

Factor	Disponibilidad real	Incremento permitido	Decremento permitido
Tierra	47 698	Infinito	47 643
Agua	274 500	427 800	150 500
Trabajo	1 534	Infinito	950

Fuente: elaboración propia.

En contraste, las metodologías arrojan resultados que difieren en \$0.08. Esto se puede deber a que los valores utilizados son similares y que las metodologías evalúan de forma objetiva el valor real del agua. Tal es el caso de Ilak *et al.* (2015), donde se empleó el método dual de programación convexa para valorar el impacto de la generación eólica variable en el precio sombra del agua de la generación hidroeléctrica en Vrataruša, Croacia, estimando el precio sombra del agua entre €0.5/h y €1/h; en este caso, si se considera el flujo promedio de agua (0.5 m³/s), la equivalencia resulta en un precio sombra de \$1.8 m³.

Uno de los valores más bajos es el de \$1.3/m³, que fue obtenido por Liu, Chen y Wang (2009) en la estimación del precio sombra para la cuenca de los ríos Songhuajiang y Liaohe, China; y uno de los más contrastantes es el trabajo de Ziolkowska (2015), llevado a cabo en EUA

dentro de la región de High Plains, con el objetivo de estimar el precio sombra del agua para riego en la agricultura, encontrando un precio sombra estimado para el trigo de \$10.18/m³ y de \$0.06/m³ para el maíz.

Por el contrario, los valores estimados del precio sombra más altos son presentados por Maziotis, Villegas y Molinos (2020) para la industria chilena de agua, habiendo calculado €2.547/h, donde al considerar un promedio anual del volumen de agua entregada de 55 836 m³, se tiene que el precio sombra del agua es de \$25.20/m³; así como por Wang, Xie, Zhang y Xiang (2018), quienes estimaron el precio sombra del agua para la industria urbana en China y concluyeron que el precio sombra es mucho mayor al precio de mercado, con un valor de \$14.24/m³.

Desde una perspectiva más general, Shen y Lin (2017) exponen la estimación del precio sombra del agua para la agricultura con base en el análisis estocástico no paramétrico de datos obtenidos de 30 unidades provinciales en China continental de 2002 a 2012, obteniendo un precio sombra promedio del agua entre \$7.96 y \$12.02/m³, con una elasticidad precio de 0.12, lo cual que indica que la reducción de la cantidad de agua agrícola depende de la mejora de la eficiencia técnica y de la difusión de técnicas de riego que ahorran agua.

Conclusiones

Desde la óptica de la metodología de contabilidad de costos, los valores actualizados de las inversiones realizadas en los últimos 70 años desde la construcción y puesta en funcionamiento de la presa Solís, divididos entre la cantidad de agua utilizada, muestran que el valor del agua de la zona es igual a \$1.03/m³. Los costos contemplan la administración y el mantenimiento que se realizan cada año.

A partir de la metodología de programación matemática, se determinó que el precio sombra del agua en la zona de estudio es de \$0.95/m³; desde la perspectiva teórica de esta metodología, el precio sombra refleja el valor real del agua. Sin embargo, considerar al agua como un factor productivo restringe su importancia, pues es un recurso indispensable para la producción agrícola.

El amplio rango de diferencia entre los valores encontrados como precio sombra del agua en los diferentes estudios puede explicarse a través de cuatro factores. Primero, el uso del agua, es decir, su finalidad como materia prima para el producto a generar, considerando que el valor final, en términos de monetarios, es diferente dependiendo de los niveles de precios de mercado del bien; por ejemplo, el agua usada para producir

granos en el sector agrícola suele tener un precio sombra inferior al agua utilizada para producir electricidad, tal como se contrasta en los trabajos de Ziolkowska (2015), con un precio sombra del agua para la producción del maíz de \$0.06m³, y el de Ilak *et al.* (2015), con un precio sombra del agua para producir electricidad de \$1.8 m³, lo que se explica el porqué la electricidad posee un precio de mercado mayor que el del maíz.

Segundo, la disponibilidad de agua, derivada de la ubicación geográfica. Para ello se deben considerar estudios comparados de diferentes países, que arrojan muy variados niveles de agua disponible, pues el valor de mercado del agua difiere; en otras palabras, su grado de escasez repercute en su valor de mercado.

Tercero, el nivel de desarrollo socioeconómico de la región de estudio, ya que a lo largo del mundo se presentan marcadas diferencias económicas con muy variados niveles de vida, lo cual se refleja en el valor de sus divisas, lo cual genera divergencia entre la valoración que se le puede asignar al agua y los valores estimados, sobre todo al realizar equivalencias entre el valor monetario internacional de las divisas, tal es el caso de este estudio, donde se comparan yuanes, dólares, euros y pesos.

Finalmente, la metodología usada para su cálculo. Como se expone a lo largo de este trabajo, la perspectiva teórica y la herramienta metodológica utilizadas para analizar un fenómeno de estudio modificará los resultados arrojados y las conclusiones a las que se llegue; en tal

sentido, esta investigación se orienta a contrastar dos metodologías para estimar el precio sombra.

El principal aporte del presente estudio es el hecho de que contrasta dos metodologías con base teórica sólida y con un grado suficiente de rigurosidad, las cuales pueden ser reproducidas y, tanto, también sus resultados extrapolados a diferentes casos de estudio; esto permite el empleo del programa de optimización y sus respectivas ecuaciones, en casos de bienes o recursos naturales cuyo precio de mercado no es el óptimo o no existe.

Las áreas de oportunidad que se desprenden a manera de sugerencia para futuras investigaciones en el área de valoración económica del agua son que con el objetivo de realizar una investigación más completa se consideren las externalidades negativas, como los daños al ecosistema y el deterioro de los recursos naturales en la zona de estudio. Las externalidades se pueden evaluar mediante la aplicación de metodologías de impacto ambiental. Aunado a esto, es necesario llevar a cabo más estudios en este rubro, que permitan complementar y profundizar en la problemática del agua en el país mediante el uso de nuevas metodologías.

Referencias

- Alcón, F., Fernández, M., & Miguel, M. (2007). Política tarifaria del agua de riego y sus efectos sobre la sustentabilidad de la producción de uva de mesa española. *Agrociencia*, 41(7), 805-815. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952007000700805&lng=es&tlng=es
- Banxico, Banco de México. (2014). *Evolución reciente de las tasas de interés de largo plazo en economías de mercados emergentes. Extracto del informe trimestral*. Recuperado de <https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/informes-trimestrales/recuadros/%7B8FA573EC-68AB-D0BA-8AB4-CFF24CA7518C%7D.pdf>
- Briseño, H. (2018). Modelos tarifarios de agua en México según criterios sociales. *Tecnología y ciencias del agua*, 9(5), 173-192. Recuperado de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1633/1467>
- Chalas, J., Ramírez, J. L., Méndez, G., & Bello, L. (2020). Sostenibilidad financiera, física y ambiental del servicio tarifario de riego en la República Dominicana. *Aqua-LAC*, 12(1), 1-21. Recuperado de <http://aqua-lac.org/index.php/Aqua-LAC/article/view/247>

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2020). *Sistema de Seguridad de Presas*. Recuperado de www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/consulta-la-base-de-datos-del-repta

Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2019). *Sistema Nacional de Información del Agua: monitoreo de las principales presas de México*. SINA: México. Recuperado de <http://sina.conagua.gob.mx/sina/almacenamientoPresas.php>

Domínguez, C. (15 de mayo, 2014). *Inicia nuevo ciclo agrícola con la apertura de la presa Solís*. Recuperado de <https://agua.org.mx/inicia-nuevo-ciclo-agricola-con-la-apertura-de-la-presa-solis/>

Exebio, A., Palacios, E., Mejía, E., & Santos, L. (2009). Conservación diferida y su impacto en el mantenimiento de distritos de riego. *Terra Latinoamericana*, 27(1), 71-83. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792009000100009&lng=es&tIng=es

Fernández-Zamudio, M., Alcón, F., & Miguel, M. (2007). Política tarifaria del agua de riego y sus efectos sobre la sustentabilidad de la producción de uva de mesa española. *Agrociencia*, 41(7), 805-815.

FIRA, Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2019). *Sistema de costos agrícolas: resumen de costos, 2019*. Sistema de

costos agrícolas. Recuperado de
<https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/TemasUsuario.jsp>

- Ilak, P., Rajšl, I., Krajcar, S., & Delimar, M. (2015). The impact of a wind variable generation on the hydro generation water shadow price. *Applied Energy*, 154(2015), 197-208.
- John, G. (1994). *Teoría microeconómica*. México, DF, México: Fondo de Cultura Económica.
- Lange, G. M. (2006). Case studies of water valuation in Namibia's commercial farming areas. In: *The economics of water management in Southern Africa: An environmental accounting approach* (pp. 237-255). Cheltenham, UK: Edward Elgar Publishing,
- Liu, X., Chen, X., & Wang, S. (2009). Evaluating and predicting shadow prices of water resources in China and its nine major river basins. *Water Resources Management*, 23(8), 1467-1478.
- Lomas, P. L., Martín, B., Louit, C., Montoya, D., Montes, C., & Álvarez, S. (2005). *Guía práctica para la valoración económica de los bienes y servicios ambientales de los ecosistemas*. Madrid, España: Fundación Interuniversitaria Fernanda González Bernáldez.
- Maziotis, A., Villegas, A., & Molinos, M. (2020). The cost of reducing unplanned water supply interruptions: A parametric shadow price approach. *Science of the Total Environment*, 719(2020), 137487.

- Molinos, M., & Guzmán, C. (2018). Reducing CO2 emissions from drinking water treatment plants: A shadow price approach. *Applied Energy*, 210, 623-631. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916313691>
- Molinos, M., Hanley, N., & Sala, R. (2015). Measuring the CO2 shadow price for wastewater treatment: A directional distance function approach. *Applied Energy*, 144(2015), 241-249. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261915002111>
- Reyes, E. (2008). *Contabilidad de costos*. México, DF, México: Editorial Limusa.
- Semarnat, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales*. Recuperado de www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-ambiental-y-de-recursos-naturales
- Shen, X., & Lin, B. (2017). The shadow prices and demand elasticities of agricultural water in China: A StoNED-based analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(2017), 21-28.
- Torres, J., García, A., García, R., Matus, J., González, E., & Pérez, A. (2013). Respuesta de la demanda de agua a cambios en el precio:

un estudio por tipo de consumidor en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 47(3), 293-307. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-319520130003000008&lng=es&tlng=es.

Wang, W., Xie, H., Zhang, N., & Xiang, D. (2018). Sustainable water use and water shadow price in China's urban industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 128(2018), 489-498. WWC, World Water Council. (2015). *World Water Council 2016-2018 Triennial Strategy*. Marsella, France: World Water Council. Recuperado de <http://www.worldwatercouncil.org/es/publications>

WWC, World Water Council. (2015). *World Water Council 2016-2018 Triennial Strategy*. Marsella, France: World Water Council. Recuperado de <http://www.worldwatercouncil.org/es/publications>

Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: concepts and methods*. London, UK: Routledge.

Ziolkowska, J. R. (2015). Shadow price of water for irrigation—A case of the High Plains. *Agricultural Water Management*, 153(2015), 20-31.