UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

Enseñar la explotación de la tierra, no la del hombre

DIVISIÓN DE CIENCIAS ECONÓMICO-ADMINISTRATIVAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL ESTADO DE MÉXICO

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE: **MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES**

APROBADA

Presenta:

DIEGO ARMANDO DOLORES CANTÚ

Bajo la supervisión de:

DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

Chapingo, México, octubre de 2026

"EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL ESTADO DE MÉXICO"

Tesis realizada por **Diego Armando Dolores Cantú**, bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS NATURALES

DIRECTOR:

DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

ASESOR:

DRA. MA. MAGDALENA SÁCHEZ ASTELLO

ASESOR:

DR. JUAN HERNÁNDEZ ORTÍZ

ASESOR:

DR. FERMÍN SANDOVAL ROMERO

CONTENIDO

LISTA DE CUADROS v

LISTA DE FIGURAS v

RESUMEN GENERAL vi

ABSTRACT vii

LISTA DE ABREVIATURAS viii

AGRADECIMIENTOS x

DEDICATORIAS xi

DATOS BIOGRÁFICOS xii

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL 1

1.1 Antecedentes 2

1.2 Planteamiento del problema 4

1.3 Justificación 5

1.4 Objetivo general 7

1.5 Objetivos específicos 7

1.6 Estructura del documento 8

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA 11

2.1 Contexto hídrico y productivo de la agricultura de riego en México 11

2.1.1 Recursos hídricos y uso agrícola del agua en México 12

2.1.2 Producción de maíz y agricultura de riego en México 14

2.1.3 Distritos de Riego y contexto productivo del Estado de México 16

2.2 Huella hídrica aplicada a la producción agrícola 17

2.2.1 Concepto y componentes de la huella hídrica 21

2.2.2 Huella hídrica de los cultivos y determinación del consumo de agua 24

2.2.3 Huella hídrica del maíz, rendimiento y productividad del agua 26

2.3 Economía y productividad del agua en la agricultura 28

2.3.1 Valor económico del agua en la agricultura 30

2.3.2 Productividad física y económica del agua 32

2.3.3 Valor marginal, precio sombra y aplicación a los Distritos de Riego . 35

2.4 Antecedentes empíricos de la huella hídrica agrícola y del maíz 36

2.5 Literatura citada..... 41

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL ESTADO DE MÉXICO..... 45

3.1 Introducción..... 46

3.2 Materiales y Métodos 48

3.3 Resultados y Discusión 53

3.4 Conclusiones..... 58

3.5 Referencias Bibliográficas..... 59

CAPITULO 4. CONCLUSIONES GENERALES..... 61

CAPÍTULO 5. LITERATURA CITADA 66

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Distribución de los usos consuntivos en México 14
Cuadro 2. Superficie sembrada, rendimiento agrícola y precio medio rural del maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024. 50
Cuadro 3. Huella hídrica azul, verde, gris y total del maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024. 54
Cuadro 4. Indicadores económicos asociados con la producción de maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024 57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estructura del documento de tesis. 10
Figura 2 Componentes de la huella hídrica en la producción agrícola. 22
Figura 3 Relación entre evapotranspiración, precipitación efectiva, requerimiento de riego y los componentes verde y azul de la huella hídrica agrícola. 25
Figura 4 Relación entre el consumo hídrico, rendimiento, huella hídrica y productividad económica del agua en la producción del maíz. 30
Figura 5 Localización de los cuatro distritos de riego considerados en la evaluación económica de la huella hídrica del maíz en el Estado de México. 48

RESUMEN GENERAL

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL ESTADO DE MÉXICO[1]

El agua constituye un recurso fundamental para la producción agrícola y su disponibilidad condiciona el desarrollo de los sistemas de riego, particularmente en regiones donde existe una creciente competencia entre usos. La huella hídrica permite relacionar los volúmenes de agua asociados con la producción obtenida y diferenciar la contribución del agua proveniente de la precipitación, el riego y la presión potencial relacionada con la contaminación. El objetivo de esta investigación fue estimar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica de la producción de maíz grano en los Distritos de Riego 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción y 088 Chiconautla durante el ciclo primavera–verano del año agrícola 2023–2024, incorporando indicadores de productividad aparente del agua y valor bruto de la producción. Los requerimientos hídricos del cultivo se estimaron mediante CROPWAT 8.0, utilizando información climática histórica de las estaciones Toluca y Chapingo, disponible en CLIMWAT 2.0, mientras que los datos de superficie sembrada, rendimiento y precio medio rural se obtuvieron de estadísticas agrícolas oficiales. Los componentes azul y verde se determinaron a partir de la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva, mientras que la huella gris se estimó mediante parámetros de fertilización nitrogenada de referencia. Los resultados mostraron una huella hídrica total comprendida entre 802.63 y 1261.19 m³/t, con el mayor valor en el DR 033 y el menor en el DR 088. Las diferencias estuvieron relacionadas con los rendimientos agrícolas y las condiciones climáticas consideradas en cada estación. El componente verde presentó la mayor participación en la huella hídrica total, seguido del gris y el azul. La productividad aparente del agua presentó valores comprendidos entre 6.62 y 9.05 MXN/m³, registrándose el mayor valor en el DR 033. Por otra parte, el DR 088 presentó el mayor valor bruto de la producción, con 31,540 MXN/ha. Los resultados muestran la importancia de analizar conjuntamente la huella hídrica, el rendimiento agrícola y los indicadores económicos para comparar la producción de maíz entre distritos de riego, considerando las limitaciones de los procedimientos utilizados.

Palabras clave: huella hídrica, maíz grano, productividad aparente del agua, distritos de riego, rendimiento agrícola.

---

[1] Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.
Autor: DIEGO ARMANDO DOLORES CANTÚ.
Director: DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ.

ABSTRACT

ECONOMIC EVALUATION OF THE WATER FOOTPRINT OF MAIZE IN IRRIGATION DISTRICTS OF THE STATE OF MEXICO[2]

Water is a fundamental resource for agricultural production, and its availability shapes the development of irrigation systems, particularly in regions where competition among water uses is increasing. The water footprint provides a means of relating water consumption to agricultural output and distinguishing the contributions of precipitation and irrigation water, as well as the potential pressure associated with pollution. The objective of this study was to determine and assess the green, blue, and gray water footprints of grain maize production in Irrigation Districts 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción, and 088 Chiconautla during the spring–summer cropping season of the 2023–2024 agricultural year, incorporating indicators of physical and economic water productivity. Crop water requirements were estimated using CROPWAT 8.0, while data on crop area, yield, and average farm-gate price were obtained from official agricultural statistics. The results showed a total water footprint ranging from 542.9 to 982.4 m³ per metric ton, with the highest values observed in Irrigation District 033 and the lowest in Districts 073 and 088. These differences were associated with crop yield, as higher production per unit area reduced the volume of water attributed to each metric ton of maize. The blue component accounted for the largest share of the estimated water footprint, while the gray water footprint highlighted the potential pressure associated with fertilizer use. The economic analysis revealed differences in the value generated per unit of water among districts, determined by the interaction between water consumption, crop yield, and product price. The results confirm the value of jointly analyzing the water footprint, crop yield, and profitability to improve water management in agricultural production.

Keywords: water footprint, maize, profitability, irrigation districts, irrigation water.

[2] Master in Science Thesis in Agricultural and Natural Resources Economics, Universidad Autónoma Chapingo.
Author: DIEGO ARMANDO DOLORES CANTÚ
Advisor: DR. RAMÓN VALDIVIA ALCALÁ

LISTA DE ABREVIATURAS

Acrónimo	Significado
CLIMWAT	Base de datos climática de la FAO utilizada en conjunto con CROPWAT
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CROPWAT	Programa de la FAO para el cálculo de requerimientos de agua de los cultivos y requerimientos de riego
CWU	*Crop Water Use* (uso o consumo de agua del cultivo)
DOF	Diario Oficial de la Federación
DR	Distrito de Riego
ETc	Evapotranspiración del cultivo
ETo o $\mathbf{ET_0}$	Evapotranspiración de referencia
EWS	*Economic Water Scarcity* (escasez económica de agua)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
HH	Huella hídrica

Acrónimo	Significado
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
ISO	*International Organization for Standardization* (Organización Internacional de Normalización)
Kc	Coeficiente del cultivo
LBR	Lámina bruta de riego
NIR	*Net Irrigation Requirement* (requerimiento neto de riego)
R	Rentabilidad
PFA	Productividad física del agua
PMR	Precio medio rural
RHA	Región Hidrológico-Administrativa
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
VBP	Valor bruto de la producción
VP	Valor de la producción

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por el apoyo brindado durante mis estudios de posgrado, el cual contribuyó a mi formación académica y a la realización de esta investigación.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por darme la oportunidad de continuar mi preparación y brindarme las herramientas para cumplir este propósito.

A la División de Ciencias Económico-Administrativas, por recibirme en su comunidad académica y contribuir a mi formación profesional.

Al Dr. Ramón Valdivia Alcalá, por dirigir este trabajo y compartir conmigo su tiempo, sus conocimientos y su experiencia.

A la Dra. Ma. Magdalena Sánchez Astello, por su apoyo durante el desarrollo de este trabajo, por el tiempo dedicado a su revisión y por sus valiosas aportaciones.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y por cada enseñanza que contribuyó a mi formación.

DEDICATORIAS

A mis padres y hermanos, porque de nuestra familia nace una parte importante de quien soy.

A Tati, Luisa, Denisse, Mijaíl, Karem, Erendira y Dilan, por el cariño y el lugar que cada uno ocupa en mi vida.

A mis amigos: Alonso, Vero, Xani, Carlos, Rubí, Roxana y Damaris, por acompañarme en este proceso, por escucharme y por compartir conmigo gratos recuerdos.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos Personales

Nombre	Diego Armando Dolores Cantú
Fecha de nacimiento	28 de junio de 1996
Lugar de nacimiento	Iliatenco, Guerrero
CURP	DOCD960628HGRLNG01
Profesión	Ingeniero en Irrigación
Cédula profesional	13837635

Desarrollo académico

Bachillerato Preparatoria Agrícola Chapingo

Generación 2011-2014

Licenciatura Ingeniería en Irrigación

Generación 2014-2018

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua constituye un recurso natural indispensable para el funcionamiento de los ecosistemas, el desarrollo de las actividades productivas y el bienestar de la población. Su disponibilidad condiciona actividades económicas como la agricultura, la industria, la generación de energía y diversos servicios, además de satisfacer las necesidades de abastecimiento de la población. Sin embargo, a diferencia de otros factores productivos, su aprovechamiento se encuentra condicionado por el funcionamiento del ciclo hidrológico, la distribución espacial y temporal de la precipitación, la capacidad de almacenamiento natural y artificial, la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas, así como por la calidad del recurso (Presidencia de la República, 2026).

Desde una perspectiva económica, el agua puede analizarse como un recurso limitado que participa en la producción y cuya asignación depende de las alternativas y restricciones del sistema. En el DR 044 Jilotepec, Zetina-Espinosa et al. (2013) utilizaron un modelo de programación lineal para estudiar la asignación entre actividades agrícolas y estimar el valor marginal del recurso. Este antecedente ilustra la necesidad de distinguir disponibilidad física, asignación y resultado económico, sin transferir sus valores a otros distritos.

Esta problemática adquiere particular relevancia en la agricultura. A escala internacional, la agricultura constituye el sector con mayor extracción de agua dulce, de acuerdo con Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2021). Para evaluar el uso agrícola debe distinguirse el agua extraída del agua efectivamente consumida: una parte del volumen retirado puede retornar al sistema y no formar parte del consumo consuntivo (Hoekstra et al., 2011).

Por esta razón, el análisis de la relación entre agricultura y agua no debe limitarse a determinar cuánto volumen se extrae de una fuente de abastecimiento. También resulta necesario conocer cuánto del recurso es efectivamente aprovechado o consumido durante el proceso productivo, cuál es la producción obtenida a partir de ese consumo y qué diferencias existen entre cultivos, regiones y sistemas de producción.

1.1 Antecedentes

El maíz tiene una importancia productiva y alimentaria destacada en México (Maraveles-Delgado et al., 2025). En la agricultura de riego, el uso eficiente del agua forma parte de los objetivos de la política hídrica nacional (Presidencia de la República, 2026). En el Estado de México existen distritos de riego con diferencias territoriales y de cultivos establecidos, que ofrecen un contexto para comparar la producción de maíz (Romero-Padilla et al., 2024).

En este contexto, resulta necesario estimar los volúmenes de agua asociados con la producción de maíz y relacionarlos con el rendimiento agrícola. Para ello, la huella hídrica permite diferenciar el aporte de la precipitación, el agua de riego y el volumen teórico relacionado con la carga contaminante, considerando los procedimientos y supuestos utilizados para su estimación (Hoekstra et al., 2011).

Mekonnen y Hoekstra (2011), en su evaluación mundial de cultivos, encontraron diferencias espaciales de huella hídrica relacionadas con las condiciones climáticas y los rendimientos. Este antecedente permite reconocer que una estimación por tonelada depende de las condiciones de producción y del origen del agua considerada; sus promedios globales no describen por sí solos cada sistema de producción mexicano.

En el Estado de México se encuentran los Distritos de Riego 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción, 088 Chiconautla y 096 Arroyozarco. Romero-Padilla et al. (2024) documentan sus diferencias territoriales, superficies y cultivos establecidos. En esta investigación se utilizan los distritos seleccionados como unidades de comparación para relacionar la producción de maíz con sus indicadores hídricos y económicos.

La evaluación del uso del agua en estos sistemas requiere distinguir la extracción del consumo. En la contabilidad propuesta por Hoekstra et al. (2011), el componente azul registra el consumo de agua de origen superficial o subterráneo, y el verde, la fracción de lluvia retenida en el suelo que se consume

durante la producción. Esta separación permite reconocer el origen del agua utilizada por el cultivo y comparar sistemas bajo límites espaciales y temporales definidos.

Otro elemento fundamental para interpretar la huella hídrica agrícola es el rendimiento. Al expresarse habitualmente en metros cúbicos de agua por tonelada de producto, el valor del indicador depende tanto del consumo de agua como de la cantidad de producto obtenida. En consecuencia, una reducción de la huella hídrica por tonelada puede deberse a una disminución del consumo de agua, a un incremento del rendimiento o a una combinación de ambos factores. La literatura sobre productividad del agua destaca precisamente que las mejoras en fertilidad del suelo, manejo agronómico, control de plagas, selección de variedades y sistemas de riego pueden elevar la producción obtenida por unidad de agua utilizada (Molden et al., 2010).

Esta relación adquiere también una dimensión económica. El objetivo del uso productivo del agua no consiste únicamente en obtener más producción física por unidad del recurso, sino también en analizar el valor económico generado mediante su aprovechamiento. Molden et al. (2010) señalan que la productividad del agua puede entenderse en un sentido amplio como los beneficios obtenidos por unidad de agua utilizada, mientras que Young y Loomis (2014) presentan métodos de valoración económica del agua para situaciones en las que no existen señales de mercado suficientes. En la agricultura, esta situación justifica complementar los indicadores físicos de consumo con medidas económicas que permitan conocer el valor generado por cada unidad de agua empleada.

En México existen antecedentes que muestran la utilidad de integrar indicadores hídricos y productivos. De esta manera, el estudio de la producción de maíz en los Distritos de Riego del Estado de México puede abordarse no solamente desde el volumen de agua estimado por tonelada producida, sino también considerando las diferencias de rendimiento y el valor comercial de la producción en relación con la huella hídrica. Esta integración permite relacionar las dimensiones hídrica y económica del proceso productivo y proporciona una base para comparar los

resultados entre distritos y discutir alternativas orientadas a mejorar la productividad del agua.

1.2 Planteamiento del problema

La gestión del agua en la agricultura requiere información precisa sobre cuánta agua se consume para producir un bien agrícola y cómo este consumo varía espacialmente. La huella hídrica es un indicador que permite estimar el volumen de agua consumida en la producción de un cultivo, distinguiendo entre el componente verde, proveniente de la precipitación efectiva, y el componente azul, correspondiente al agua de riego (Hoekstra et al., 2011).

A nivel de distritos de riego del Estado de México, resulta necesario contar con estimaciones comparables de la huella hídrica del maíz que permitan identificar diferencias entre distritos y analizar su relación con el rendimiento agrícola y el valor económico de la producción. La disponibilidad de esta información permitiría ampliar el análisis del aprovechamiento hídrico y económico del cultivo, proporcionando elementos para comparar los resultados obtenidos y contribuir a una mejor gestión del recurso hídrico en la agricultura.

La problemática adquiere mayor relevancia cuando se considera que un mismo volumen de agua puede generar cantidades diferentes de producto dependiendo de las condiciones productivas de cada distrito. Debido a que la huella hídrica de un cultivo se obtiene relacionando el consumo de agua con su rendimiento, diferencias relativamente pequeñas en la productividad agrícola pueden modificar de manera considerable el volumen de agua atribuido a cada tonelada producida. Por esta razón, interpretar una huella hídrica elevada únicamente como resultado de un mayor requerimiento de agua puede conducir a conclusiones incompletas, ya que también puede ser consecuencia de rendimientos reducidos (Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2011).

A esta dimensión física se suma un problema económico. La productividad del agua puede expresarse mediante la cantidad de producto o su valor monetario por unidad de agua, siempre que se especifique el volumen considerado (FAO, 2003). En esta investigación, el cociente entre el precio por tonelada y la huella

consuntiva en m³/t se utiliza como indicador de valor bruto por m³. Si dos distritos tienen la misma huella consuntiva, la diferencia de este cociente depende del precio; el rendimiento ya interviene en la construcción de la huella por tonelada. Este indicador se distingue de una estimación marginal del recurso.

Los antecedentes disponibles incluyen aplicaciones mexicanas a distintos cultivos y sistemas. Ríos Flores et al. (2015) estudiaron forrajes del DR 017 Comarca Lagunera, mientras que Vázquez del Mercado Arribas y Lambarri Beléndez (2017) reunieron estudios de caso de huella hídrica en México. Estos antecedentes ofrecen referencias para el presente análisis, cuyo objetivo específico es comparar la producción de maíz de los distritos seleccionados del Estado de México bajo un mismo marco metodológico. La comparación se realiza con condiciones hídricas de referencia comunes, por lo que sus diferencias deben interpretarse considerando los supuestos de estimación.

En este sentido, el problema de investigación puede plantearse a partir de la necesidad de conocer cómo varían los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del maíz entre los distritos de riego analizados y cómo dichas diferencias se relacionan con el rendimiento agrícola y el valor económico de la producción por unidad de huella hídrica durante el ciclo agrícola 2023–2024. La generación de esta información permitiría pasar de una comparación exclusivamente volumétrica del uso del recurso hacia una evaluación conjunta de su desempeño hídrico, productivo y económico.

1.3 Justificación

La determinación de la huella hídrica del maíz en los distritos de riego del Estado de México permitirá estimar los componentes azul, verde y gris asociados con la producción del cultivo, además de comparar los valores de huella hídrica por tonelada producida entre distritos, considerando las diferencias en rendimiento agrícola y los parámetros utilizados en su estimación. Esta información puede contribuir al análisis del aprovechamiento hídrico y proporcionar elementos técnicos útiles para la planeación y gestión del riego agrícola.

Los resultados de este estudio pueden servir como insumo para la toma de decisiones en materia de uso eficiente del agua y para futuros análisis económicos y de sostenibilidad del sector agrícola.

Desde el punto de vista hídrico, la investigación se justifica por la necesidad de mejorar la información disponible sobre la relación entre producción agrícola y consumo de agua. La huella hídrica permite complementar los indicadores tradicionales basados en extracción o suministro, debido a que identifica el volumen consumido y diferencia su procedencia entre agua verde y azul, además de incorporar mediante la huella gris una aproximación a la presión asociada con la contaminación. Esta diferenciación resulta especialmente importante en sistemas agrícolas bajo riego, donde la precipitación y el agua suministrada pueden contribuir simultáneamente al requerimiento hídrico del cultivo (Hoekstra et al., 2011).

Desde el punto de vista productivo, la comparación entre distritos permitirá analizar la relación entre los rendimientos agrícolas y la huella hídrica por tonelada de maíz producida, considerando condiciones hídricas de referencia comunes. La productividad del agua constituye un indicador relevante porque permite relacionar el recurso utilizado con la producción obtenida y reconocer que las estrategias para mejorar el desempeño hídrico no se limitan a reducir el volumen de riego. Molden et al. (2010) identifican posibilidades de mejora mediante el manejo del suelo, los cultivos y el agua, pero advierten que aumentar el rendimiento no garantiza por sí mismo una mayor productividad hídrica. Por ello, las mejoras deben evaluarse relacionando producción y consumo y atendiendo a la escala del sistema.

La incorporación de una dimensión económica amplía la utilidad del análisis. Debido a que el agua constituye un recurso escaso y un factor de producción, resulta pertinente conocer no sólo el volumen estimado para obtener una tonelada de maíz, sino también el valor comercial de la producción en relación con la huella hídrica. Young y Loomis (2014) presentan métodos de valoración del agua ante la insuficiencia de señales de mercado. La incorporación de

indicadores económicos, como la relación entre el precio medio rural y la huella hídrica consuntiva, integrada por los componentes azul y verde, permitirá comparar el desempeño de los distritos desde una perspectiva complementaria al análisis hídrico.

Finalmente, el estudio posee relevancia regional debido a las diferencias existentes entre los distritos de riego del Estado de México. Investigaciones recientes muestran que estos espacios presentan características territoriales y productivas diferenciadas aun cuando se localizan dentro de una misma entidad federativa (Romero-Padilla et al., 2024). Analizar el cultivo de maíz a esta escala permitirá generar información específica que podría servir como referencia para el manejo del agua, la planeación agrícola y posteriores estudios orientados a evaluar alternativas de mejoramiento de la productividad hídrica y económica.

1.4 Objetivo general

Estimar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica asociados con la producción de maíz grano en los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088 del Estado de México durante el ciclo agrícola 2023–2024, incorporando indicadores económicos de productividad aparente del agua y valor bruto de la producción para comparar los resultados entre los distritos analizados.

1.5 Objetivos específicos

Caracterizar las condiciones productivas de los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088 del Estado de México, considerando la superficie sembrada, el rendimiento agrícola y el precio medio rural del maíz grano durante el ciclo agrícola 2023–2024.

Estimar los requerimientos hídricos del cultivo de maíz grano mediante CROPWAT 8.0, utilizando información climática de referencia para determinar la evapotranspiración del cultivo, la precipitación efectiva y los requerimientos de riego.

Cuantificar los componentes verde, azul y gris de la huella hídrica del maíz grano en cada uno de los Distritos de Riego seleccionados.

Determinar la huella hídrica total del maíz grano por unidad de producción (m^3/t), mediante la suma de sus componentes azul, verde y gris, para comparar los valores obtenidos entre los distritos de riego analizados.

Estimar la productividad aparente del agua mediante la relación entre el precio medio rural y los componentes azul y verde de la huella hídrica, así como determinar el valor bruto de la producción de maíz grano por unidad de superficie en cada Distrito de Riego.

Comparar los resultados obtenidos entre los Distritos de Riego analizados e identificar la relación existente entre rendimiento agrícola, huella hídrica, productividad aparente del agua y valor bruto de la producción, considerando las condiciones climáticas de referencia utilizadas

1.6 Estructura del documento

La presente tesis se encuentra organizada en cuatro capítulos que, de manera complementaria, permiten desarrollar el análisis de la huella hídrica y su relación con la productividad económica del agua en la producción de maíz grano de los Distritos de Riego del Estado de México.

El primer capítulo corresponde a la introducción general de la investigación. En este apartado se presentan los antecedentes relacionados con la importancia del agua en la producción agrícola y la relevancia del cultivo de maíz dentro del sector agrícola nacional. Asimismo, se desarrolla el planteamiento del problema y la justificación del estudio, a partir de los cuales se establecen los objetivos que orientan la investigación. En conjunto, este capítulo permite delimitar el problema de estudio y establecer la importancia de analizar conjuntamente el consumo de agua, el rendimiento agrícola y el valor económico generado mediante su utilización.

El segundo capítulo desarrolla la revisión de literatura, en una primera parte se presenta el contexto hídrico y productivo de la agricultura de riego en México, incluyendo la importancia del uso agrícola del agua, la producción de maíz y las características generales de los distritos de riego. Posteriormente, se aborda el

concepto de huella hídrica y sus componentes verde, azul y gris, así como los fundamentos para determinar el consumo de agua de los cultivos mediante variables como la evapotranspiración, la precipitación efectiva y los requerimientos de riego. También se desarrolla la relación entre huella hídrica, rendimiento y productividad del agua. Finalmente, se incorpora la dimensión económica del recurso hídrico, diferenciando conceptos como productividad económica, valor económico y valor marginal del agua, además de revisar antecedentes empíricos relacionados con la estimación de la huella hídrica agrícola y, particularmente, con el cultivo de maíz.

El tercer capítulo constituye la parte empírica de la investigación y se centra en la evaluación económica de la huella hídrica de la producción de maíz grano en los Distritos de Riego 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción y 088 Chiconautla. En este capítulo se presentan los materiales y métodos utilizados para estimar los requerimientos hídricos del cultivo y determinar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica, considerando información climática histórica de las estaciones Toluca y Chapingo. Asimismo, se incorporan variables relacionadas con el rendimiento, la superficie sembrada y el precio medio rural para estimar la productividad aparente del agua y el valor bruto de la producción por hectárea. Los resultados obtenidos permiten comparar los distritos bajo las condiciones climáticas de referencia utilizadas y analizar la relación existente entre rendimiento agrícola, huella hídrica y los indicadores económicos estimados.

El cuarto capítulo presenta las conclusiones generales derivadas del desarrollo de la investigación. En este apartado se integran los principales hallazgos obtenidos a partir de la revisión teórica y del análisis realizado en los Distritos de Riego seleccionados. También se identifican las principales limitaciones del estudio y se plantean recomendaciones para investigaciones posteriores, particularmente relacionadas con el uso de información climática y productiva de mayor resolución espacial, el análisis de las condiciones particulares de las fuentes de abastecimiento y la incorporación de métodos económicos que permitan profundizar en la valoración del recurso hídrico.

En conjunto, la estructura del documento permite avanzar de manera ordenada desde la contextualización del problema y sus fundamentos conceptuales hasta la estimación y evaluación de la huella hídrica del maíz. De esta manera, la investigación integra las dimensiones hídrica, productiva y económica con el propósito de generar información que contribuya a una mejor comprensión del aprovechamiento del agua en la agricultura de riego y sirva como referencia para posteriores análisis orientados al mejoramiento de su productividad.

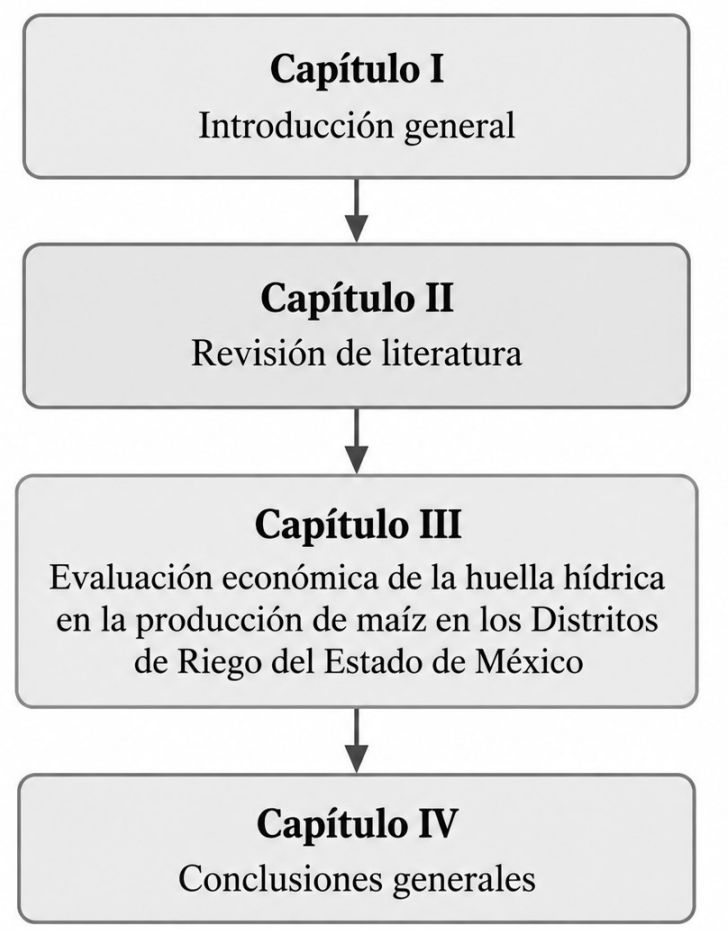


Figura 1 Estructura del documento de tesis.

Fuente: Propia

CAPITULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Este apartado aborda lo relativo a la revisión de literatura, relacionada con aspectos generales del sector hídrico, sus problemáticas y en específico con la huella hídrica y su aplicación en la agricultura.

2.1 Contexto hídrico y productivo de la agricultura de riego en México

La disponibilidad y el aprovechamiento del agua constituyen factores fundamentales para el desarrollo de la agricultura, particularmente en aquellas regiones donde la producción depende parcial o totalmente del riego. El análisis de los recursos hídricos destinados a la producción agrícola requiere considerar no sólo la cantidad de agua disponible, sino también su distribución espacial y temporal, las fuentes de abastecimiento, la infraestructura existente, las condiciones climáticas y la productividad obtenida mediante su utilización. Estas variables determinan la presión ejercida sobre el recurso y condicionan la capacidad de los sistemas agrícolas para mantener o incrementar su producción (Hoekstra et al., 2011; Presidencia de la República, 2026).

En México existe una marcada desigualdad territorial en la disponibilidad de agua. Las regiones centro y norte concentran una proporción elevada de la población y de la actividad económica, mientras que una parte considerable del agua renovable se localiza en las regiones sur y sureste. Esta distribución constituye uno de los principales retos para la gestión hídrica nacional, debido a que las regiones con menor disponibilidad relativa concentran actividades urbanas, industriales y agrícolas que demandan importantes volúmenes de agua (Presidencia de la República, 2026).

La relación entre disponibilidad de agua y producción agrícola adquiere particular importancia debido al peso que tiene la agricultura dentro del aprovechamiento nacional del recurso. Por esta razón, la eficiencia en el riego, la productividad del agua y la reducción de pérdidas durante su conducción y aplicación forman parte de los elementos centrales para analizar la sostenibilidad de la producción agrícola. El Programa Nacional Hídrico 2026–2030 reconoce esta relación al incorporar entre sus objetivos el incremento del uso eficiente y sustentable del

agua en los sectores productivos y, particularmente, el aumento de la productividad del agua utilizada en las actividades agrícolas de riego (Presidencia de la República, 2026).

El maíz es uno de los cultivos relevantes de la agricultura mexicana y se produce bajo temporal y riego (Maraveles-Delgado et al., 2025). Las diferencias climáticas y de rendimiento pueden modificar la huella por unidad de producto (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Para el presente análisis, se relacionan los volúmenes consuntivos estimados con la producción y con su valor bruto; esta elección es compatible con el enfoque de productividad del agua, que admite numeradores físicos o monetarios (FAO, 2003).

2.1.1 Recursos hídricos y uso agrícola del agua en México

México presenta condiciones hidrológicas contrastantes como resultado de las diferencias regionales en precipitación, evapotranspiración, escurrimiento y recarga de acuíferos. De acuerdo con el Programa Nacional Hídrico 2026–2030, el volumen medio de agua renovable del país se estima en aproximadamente 471,712.6 hm^3 anuales. Considerando una población aproximada de 132.3 millones de habitantes, la disponibilidad media resultante es de 3,566.2 m^3 por habitante al año; sin embargo, este promedio nacional no representa adecuadamente las condiciones particulares de cada región (Presidencia de la República, 2026).

Las diferencias territoriales son particularmente evidentes al comparar las Regiones Hidrológico-Administrativas. Mientras algunas regiones del sur presentan una elevada disponibilidad relativa, la RHA XIII Aguas del Valle de México registra aproximadamente 3,444.8 hm^3 de agua renovable y una disponibilidad de apenas 141.1 m^3 por habitante al año. Estas diferencias muestran que la problemática hídrica no depende exclusivamente de la cantidad total de agua existente en el país, sino también de la concentración territorial de la población, las actividades económicas y la demanda de los distintos sectores usuarios (Presidencia de la República, 2026).

Dentro de esta demanda, la agricultura ocupa una posición central. Las estadísticas oficiales de los Distritos de Riego muestran que el aprovechamiento del agua se encuentra directamente relacionado con la superficie irrigada, los cultivos establecidos y la disponibilidad existente en las fuentes de abastecimiento. La CONAGUA señala que la programación agrícola de los distritos de riego considera los volúmenes disponibles en presas, pozos y corrientes superficiales, a partir de los cuales se elaboran los planes de riego y se registran los volúmenes utilizados durante cada año agrícola (Comisión Nacional del Agua [CONAGUA], 2025).

La importancia del sector agrícola explica que las estrategias de gestión del agua no puedan concentrarse únicamente en aumentar la oferta. También resulta necesario mejorar la forma en que el recurso se conduce, distribuye y utiliza dentro de las zonas agrícolas. En este sentido, la modernización y tecnificación de la infraestructura hidroagrícola tienen como propósito incrementar la producción y productividad mediante un mejor aprovechamiento del agua disponible (CONAGUA, 2025).

La agricultura mexicana utiliza fuentes superficiales y subterráneas. El Programa Nacional Hídrico 2026–2030 informa que el sector agrícola concentró, en 2023, 79.3 % del volumen aprovechado de aguas superficiales y 71.1 % de las extracciones de aguas subterráneas; estos porcentajes tienen denominadores distintos (Presidencia de la República, 2026). Por ello, el análisis de esta tesis distingue el origen del agua y evita interpretar un porcentaje nacional como una medición específica de cada distrito.

Cuadro 1. Distribución de los usos consuntivos en México

Uso	Volumen aproximado (hm³/año)	Participación
Agrícola	68,900	76.02 %
Abastecimiento público	13,500	14.90 %
Industria autoabastecida	4,200	4.63 %
Termoeléctricas	4,030	4.45 %
Total	**90,629**	**100 %**

Fuente: elaboración propia con base en Presidencia de la República (2026, tabla 2). Nota. Los datos corresponden a volúmenes concesionados para usos consuntivos, con corte a diciembre de 2023; no representan consumo medido en 2026. Las diferencias entre la suma de los rubros y el total mostrado se deben al redondeo

2.1.2 Producción de maíz y agricultura de riego en México

El maíz (Zea mays L.) constituye uno de los cultivos de mayor importancia dentro de la agricultura mexicana por su participación en la alimentación, la producción pecuaria, diferentes actividades agroindustriales y la generación de ingresos en el sector rural. Su cultivo se encuentra distribuido prácticamente en todo el territorio nacional y presenta una amplia diversidad de condiciones tecnológicas y productivas. Durante 2023, la producción nacional fue cercana a 27 millones de toneladas y el rendimiento promedio alcanzó aproximadamente 3.89 t/ha; además, entre 1994 y 2023 el rendimiento promedio nacional mostró un incremento considerable, aun cuando la superficie destinada al cultivo presentó una disminución durante el mismo periodo (Maraveles-Delgado et al., 2025).

Una característica importante de la producción nacional es la coexistencia de sistemas de temporal y de riego. En los primeros, el desarrollo del cultivo depende principalmente de la precipitación y del agua almacenada en el suelo, mientras que en los sistemas irrigados las necesidades hídricas pueden ser

complementadas mediante agua procedente de fuentes superficiales o subterráneas. Esta diferencia modifica tanto el manejo productivo como la composición de la huella hídrica, debido a que los sistemas bajo riego pueden utilizar simultáneamente agua verde proveniente de la precipitación y agua azul suministrada mediante la infraestructura hidroagrícola (Hoekstra et al., 2011).

Montesillo-Cedillo (2016) comparó los rendimientos del maíz de riego y temporal en México entre los años agrícolas 2001–2002 y 2013–2014 mediante análisis de varianza y reportó igualdad estadística al nivel de confianza considerado. Este resultado se refiere al contraste y periodo de ese estudio; no demuestra por sí solo los efectos de cada factor agronómico. El procedimiento FAO 56 reconoce, por separado, que el clima, las características del cultivo y su manejo intervienen en los requerimientos hídricos (Allen et al., 1998).

Esta consideración es importante para el análisis de la huella hídrica. Un mayor suministro de agua no necesariamente significa una mayor eficiencia hídrica, de la misma manera que una menor cantidad aplicada no garantiza un mejor aprovechamiento del recurso. El desempeño debe evaluarse relacionando el consumo de agua con la cantidad de producto obtenida. Por ello, el rendimiento desempeña un papel fundamental en la huella hídrica expresada en m^3/t, debido a que un mismo consumo de agua por hectárea puede originar valores distintos del indicador dependiendo de la cantidad de maíz producida.

Los distritos de riego constituyen una escala adecuada para estudiar esta relación porque cuentan con información agrícola e hidrométrica que permite vincular superficie sembrada, producción, rendimiento, precio medio rural y volúmenes de agua destinados al riego. La CONAGUA integra estas variables anualmente para los 86 Distritos de Riego del país, que comprenden aproximadamente 3.3 millones de hectáreas bajo riego (CONAGUA, 2025). La disponibilidad conjunta de información productiva e hídrica permite utilizar estas unidades territoriales para estudiar las diferencias en productividad y consumo de agua asociadas con un mismo cultivo.

2.1.3 Distritos de Riego y contexto productivo del Estado de México

En el Estado de México, las áreas de los distritos de riego coexisten con espacios urbanos y metropolitanos y presentan cambios territoriales diferenciados. Romero-Padilla et al. (2024) documentan la pérdida de superficie agrícola y los patrones de crecimiento urbano de esos distritos entre 2010 y 2022. Este antecedente proporciona el contexto territorial de la comparación planteada en esta investigación.

Dentro de la entidad existen cinco Distritos de Riego localizados principalmente en su porción norte: 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción, 088 Chiconautla y 096 Arroyozarco. Romero-Padilla et al. (2024) señalan que estas unidades presentan diferencias en extensión, localización, dinámica territorial y cultivos establecidos. Entre los productos agrícolas presentes en los distintos distritos se encuentra recurrentemente el maíz grano, acompañado de cultivos como avena y maíz forrajero, alfalfa, rye Grass, trigo, papa, frutales y cultivos bajo invernadero.

Estas diferencias son particularmente relevantes para la investigación porque aún dentro de una misma entidad federativa los distritos de riego no constituyen sistemas productivos homogéneos. El DR 033 Estado de México se encuentra relacionado principalmente con la cuenca Lerma-Santiago-Pacífico, mientras que los DR 044, 073, 088 y 096 mantienen una mayor relación territorial con la cuenca del Valle de México. Asimismo, los distritos 073 La Concepción y 088 Chiconautla se encuentran dentro de zonas fuertemente influenciadas por el crecimiento metropolitano, lo que ha generado cambios en el uso del suelo y pérdida de superficie agrícola (Romero-Padilla et al., 2024).

El maíz aparece entre los cultivos presentes en los cinco distritos, aunque su importancia relativa y las condiciones de producción varían entre ellos. En los DR 033 y 044 se reporta maíz grano entre los principales cultivos; de igual forma, está presente en los DR 073 y 088, aunque éstos presentan una mayor diversificación hacia cultivos forrajeros. El DR 096 Arroyozarco también registra

maíz grano entre sus actividades agrícolas predominantes (Romero-Padilla et al., 2024).

Para la presente investigación, el análisis se concentra en los DR 033, 044, 073 y 088, en los cuales se dispone de información de producción de maíz correspondiente al periodo de estudio. Esta delimitación debe explicarse expresamente en la metodología, debido a que el Estado de México cuenta también con el DR 096 Arroyozarco. La comparación entre los distritos seleccionados permite analizar la producción de un mismo cultivo dentro de contextos territoriales diferentes y relacionar el rendimiento obtenido con el consumo de agua y la huella hídrica resultante.

La utilización del Distrito de Riego como unidad de análisis también ofrece una ventaja metodológica, ya que las estadísticas de CONAGUA incluyen variables agrícolas —superficie sembrada y cosechada, rendimiento, producción, precio medio rural y valor de producción— junto con información sobre los volúmenes de agua empleados para riego (CONAGUA, 2025). Estas variables proporcionan la base necesaria para posteriormente vincular la dimensión física de la huella hídrica con los indicadores de productividad del agua considerados en esta investigación.

2.2 Huella hídrica aplicada a la producción agrícola

El análisis tradicional del uso del agua en la agricultura se ha basado principalmente en indicadores como el volumen extraído, suministrado o aplicado mediante riego. Aunque estas variables son necesarias para conocer la demanda que los sistemas productivos ejercen sobre las fuentes de abastecimiento, no permiten distinguir completamente qué parte del recurso es consumida durante el proceso productivo, cuál procede de la precipitación y qué presión puede generarse sobre la calidad del agua. La metodología de huella hídrica amplía este enfoque al estudiar el consumo y la contaminación del agua asociados con la producción de bienes y servicios, identificando además el lugar y el periodo en que ocurre el uso del recurso (Hoekstra et al., 2011).

El concepto de huella hídrica se encuentra estrechamente relacionado con el de agua virtual, propuesto inicialmente para analizar el agua utilizada en la producción de bienes comercializados entre regiones. La huella hídrica amplió esta perspectiva al diferenciar el origen del recurso y distinguir entre agua verde, azul y gris. Además, su análisis puede realizarse para productos, procesos productivos, consumidores, empresas o regiones, dependiendo del objetivo y los límites establecidos para la evaluación (Hoekstra et al., 2011). La Water Footprint Network reconoce el manual publicado por Hoekstra et al. (2011) como el marco metodológico de referencia para este tipo de evaluaciones.

La cuantificación de los componentes verde, azul y gris constituye solamente una parte de una evaluación integral de la huella hídrica. Hoekstra et al. (2011) proponen un procedimiento integrado por cuatro fases: definición de objetivos y alcance; contabilidad de la huella hídrica; evaluación de su sostenibilidad; y formulación de alternativas de respuesta. La primera establece los límites espaciales, temporales y productivos del estudio; la segunda cuantifica los componentes de la huella; mientras que la tercera relaciona los volúmenes obtenidos con las condiciones ambientales, sociales y económicas del territorio donde ocurre el aprovechamiento. Finalmente, la fase de respuesta utiliza la información anterior para identificar alternativas de reducción, manejo o reasignación del recurso. Estas etapas no necesariamente deben desarrollarse en su totalidad dentro de una misma investigación, pues el alcance puede concentrarse exclusivamente en la contabilidad o avanzar hacia el análisis de sostenibilidad dependiendo del objetivo planteado (Hoekstra et al., 2011).

De manera paralela al enfoque desarrollado por la Water Footprint Network, existen metodologías de evaluación del agua vinculadas con el Análisis de Ciclo de Vida. La norma ISO 14046:2014 establece principios, requisitos y directrices para evaluar la huella de agua de productos, procesos y organizaciones desde esta perspectiva. Su enfoque no se limita a contabilizar volúmenes utilizados, sino que busca representar los impactos ambientales potenciales relacionados con el consumo y la degradación del recurso, pudiendo expresar los resultados

mediante uno o varios indicadores de impacto (International Organization for Standardization [ISO], 2014).

Aunque ambos enfoques estudian la relación entre las actividades humanas y los recursos hídricos, no deben interpretarse como metodologías idénticas. La metodología de Hoekstra et al. (2011), utilizada en esta investigación, se orienta principalmente hacia la contabilidad espacial y temporal de los componentes verde, azul y gris y su posterior evaluación dentro del contexto territorial donde ocurre el consumo. En cambio, la ISO 14046 se encuentra vinculada metodológicamente con el Análisis de Ciclo de Vida y con la evaluación de impactos potenciales (ISO, 2014). Esta diferenciación resulta importante para definir con claridad el alcance del presente estudio y justificar el empleo de la metodología de la Water Footprint Network para estimar la huella hídrica de la producción agrícola.

La norma ISO 14046:2014 establece principios, requisitos y directrices para una evaluación de huella de agua basada en el análisis de ciclo de vida de productos, procesos y organizaciones (ISO, 2014).

En el sector agrícola, la utilidad de este indicador radica en que permite relacionar el consumo hídrico con la cantidad de producto obtenida. De esta forma, no solamente interesa conocer cuántos metros cúbicos de agua fueron empleados durante un ciclo agrícola, sino cuánta agua fue necesaria para obtener una tonelada de producto. Esta distinción facilita la comparación entre cultivos o regiones que presentan diferentes condiciones climáticas y niveles de rendimiento. Mekonnen y Hoekstra (2011) demostraron que las huellas hídricas agrícolas presentan una importante variación espacial como consecuencia de diferencias en clima, suelo, disponibilidad de agua, sistema productivo y rendimiento.

Sin embargo, la huella hídrica por sí sola no determina si el uso del agua es sostenible. Un mismo valor de huella azul puede tener implicaciones distintas dependiendo de la disponibilidad local del recurso y de la presión existente sobre la cuenca o acuífero donde se origina el agua. En consecuencia, el indicador

debe interpretarse conjuntamente con las condiciones territoriales en que ocurre el consumo. Esta consideración es particularmente importante en agricultura de riego, donde el aprovechamiento de agua superficial o subterránea puede competir con otros usos productivos, urbanos o ambientales (Hoekstra et al., 2011).

Para la presente investigación, la huella hídrica se utiliza como un indicador que permite cuantificar y comparar el agua asociada con la producción de maíz grano en los distritos de riego seleccionados del Estado de México. Su aplicación permite separar la contribución de la precipitación y del agua de riego, incorporar una aproximación de la presión asociada con la contaminación por fertilización y relacionar estos componentes con el rendimiento obtenido en cada distrito.

La interpretación territorial de la huella hídrica resulta fundamental debido a que un mismo volumen de agua consumida no genera necesariamente las mismas consecuencias en diferentes regiones. Una huella azul determinada puede representar una presión relativamente reducida en una cuenca con disponibilidad suficiente y, al mismo tiempo, adquirir una importancia considerable en una región donde la extracción compite con otros usuarios o supera la disponibilidad sostenible. Por esta razón, Aldaya et al. (2010) señalan que la información sobre huella hídrica y agua virtual puede contribuir a la gestión del recurso siempre que sea analizada conjuntamente con las características hidrológicas, económicas y territoriales del área donde ocurre el consumo.

Perry (2014) cuestiona el uso de las huellas volumétricas como fundamento suficiente para decisiones de política y comercio, porque los efectos del uso del agua dependen del contexto local. Por ello, una menor huella por unidad de producto no acredita por sí sola una mejora equivalente en sostenibilidad: es necesario considerar las condiciones del sistema donde se utiliza el recurso.

Para la presente investigación, esta consideración implica que las diferencias encontradas entre los distritos de riego deben interpretarse principalmente como variaciones en el volumen de agua asociado con la producción y en la productividad obtenida a partir de dicho recurso. Una menor huella hídrica por

tonelada representa un mejor desempeño relativo bajo los límites establecidos en el estudio, pero no permite afirmar, por sí misma, que la producción sea ambientalmente sostenible. Una evaluación de este tipo requeriría incorporar información adicional sobre disponibilidad de agua superficial y subterránea, estacionalidad, condiciones ambientales de las fuentes de abastecimiento y demandas concurrentes.

2.2.1 Concepto y componentes de la huella hídrica

La huella hídrica de un producto representa el volumen de agua dulce consumido o contaminado durante su proceso de producción. En el caso de los productos agrícolas, el indicador se expresa generalmente en unidades de volumen por unidad de producto, como metros cúbicos por tonelada $(\mathrm{m3/t})$. Su estructura distingue tres componentes (verde, azul y gris) que representan diferentes formas de apropiación del recurso hídrico (Hoekstra et al., 2011).

$$HH_{total} = HH_{verde} + HH_{azul} + HH_{gris}$$

Los tres componentes de la huella hídrica representan formas distintas de relación entre la producción agrícola y los recursos hídricos. Mientras las huellas verde y azul corresponden al consumo de agua procedente de diferentes fuentes, la huella gris constituye un indicador asociado con la presión potencial sobre la calidad del recurso. La Figura 2 presenta de manera esquemática estas diferencias.

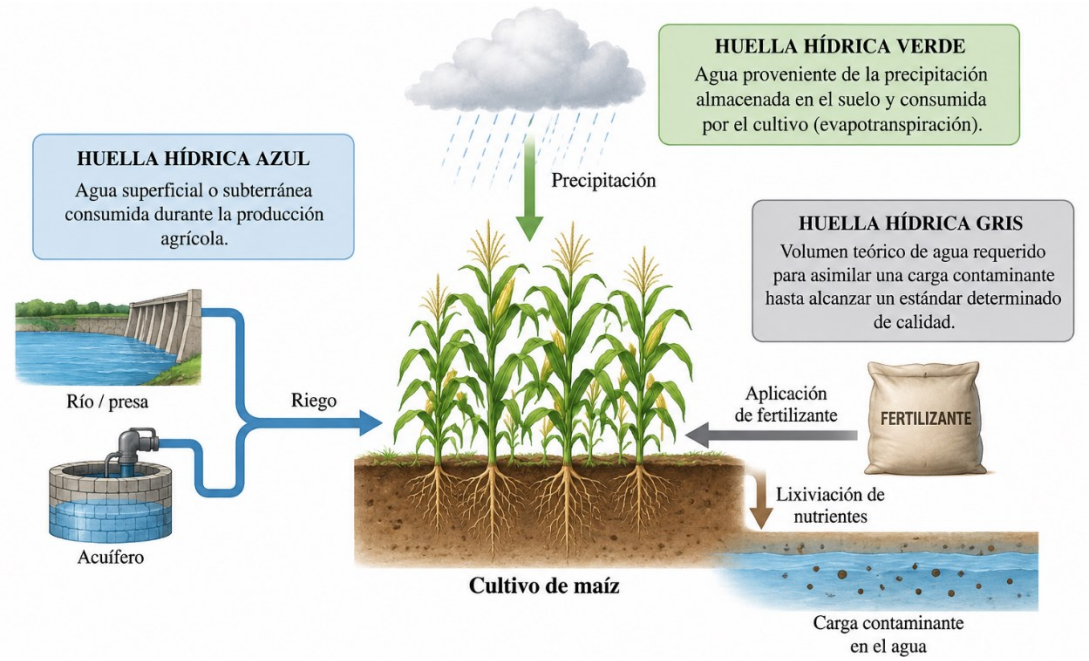


Figura 2 **Componentes de la huella hídrica en la producción agrícola.**

Fuente: Hoekstra et al. (2011)

En el componente verde se contabiliza el agua de lluvia que permanece en el suelo y se consume mediante evapotranspiración durante el desarrollo del cultivo; este aporte puede participar tanto en temporal como en sistemas con riego (Hoekstra et al., 2011). A escala mundial, Mekonnen y Hoekstra (2011) estimaron que el agua verde constituye la mayor fracción de la huella relacionada con la producción agrícola, aunque su participación varía entre cultivos y regiones.

El componente azul contabiliza la fracción de agua superficial o subterránea que se consume en la producción. En el cultivo, comprende el agua de riego evapotranspirada y las demás pérdidas de disponibilidad que correspondan a los límites espaciales y temporales de la evaluación. Por ello, el volumen captado o aplicado no equivale automáticamente a consumo: los retornos que permanecen disponibles dentro de esos límites deben distinguirse del agua consumida (Hoekstra et al., 2011).

Esta diferencia es importante para la metodología de la presente investigación. Hoekstra et al. (2011) establecen en el manual de evaluación de la huella hídrica

que, para un cultivo, los componentes verde y azul se obtienen mediante el uso de agua del cultivo o Crop Water Use (CWU), relacionado con la evapotranspiración correspondiente a cada fuente de agua. En consecuencia:

$$HH_{verde} = \frac{CWU_{verde}}{Y}$$

$$HH_{azul} = \frac{CWU_{azul}}{Y}$$

donde Y representa el rendimiento del cultivo. El consumo de agua del cultivo se expresa en m^3/ha, mientras que el rendimiento se expresa en t/ha; la relación entre ambas variables genera una huella hídrica en m^3/t (Hoekstra et al., 2011).

La **huella hídrica gris**, a diferencia de los componentes anteriores, no representa un volumen físicamente consumido mediante evapotranspiración. Se trata de un indicador del volumen teórico de agua necesario para asimilar una determinada carga de contaminante hasta alcanzar un estándar específico de calidad. Su magnitud depende de la cantidad de contaminante que alcanza los cuerpos de agua, de la concentración natural existente y de la concentración máxima permitida:

$$HH_{gris} = \frac{L}{C_{max} - C_{nat}}$$

donde Lcorresponde a la carga contaminante, C_{max}a la concentración máxima aceptada y C_{nat}a la concentración natural del contaminante (Hoekstra et al., 2011).

En agricultura, uno de los contaminantes considerados con mayor frecuencia es el nitrógeno procedente de los fertilizantes. Mekonnen y Hoekstra (2011) incorporaron este componente en su evaluación mundial de cultivos estimando la fracción de nitrógeno aplicada que potencialmente alcanza los sistemas hídricos. Debido a que este cálculo depende de supuestos sobre dosis de fertilización, fracción de lixiviación y concentraciones permisibles, sus resultados deben interpretarse como un indicador de presión potencial y no como una medición directa de contaminación.

2.2.2 Huella hídrica de los cultivos y determinación del consumo de agua

La determinación de la huella hídrica de un cultivo requiere conocer el volumen de agua consumido durante su ciclo de crecimiento y relacionarlo con la producción obtenida. El consumo agrícola está estrechamente vinculado con la evapotranspiración, entendida como la combinación de la evaporación desde el suelo y la transpiración de las plantas. Para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos, la FAO desarrolló el procedimiento FAO Penman-Monteith como método estándar para calcular la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de variables meteorológicas como radiación, temperatura, humedad y velocidad del viento (Allen et al., 1998).

A partir de la evapotranspiración de referencia puede calcularse la evapotranspiración del cultivo mediante:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

donde ET_ccorresponde a la evapotranspiración del cultivo y $K_c$es un coeficiente que representa las características particulares del cultivo y su etapa de desarrollo. El valor de $K_c$cambia durante el ciclo agrícola, por lo que normalmente se distinguen las siguientes etapas: inicial, de desarrollo, media y final (Allen et al., 1998).

Para la evaluación de la huella hídrica resulta necesario determinar qué proporción de esta evapotranspiración es satisfecha por la precipitación y qué proporción depende del riego. Conceptualmente, la evapotranspiración verde representa la parte cubierta con agua procedente de la lluvia almacenada en el suelo, mientras que la evapotranspiración azul corresponde a la fracción satisfecha mediante agua superficial o subterránea suministrada por riego. Esta separación debe realizarse mediante un balance de humedad que considere la distribución temporal de la precipitación, la demanda del cultivo y la capacidad del suelo para almacenar agua (Hoekstra et al., 2011).

La estimación de los componentes verde y azul de la huella hídrica requiere relacionar la demanda de agua del cultivo con las fuentes que satisfacen dicha

demanda. La precipitación efectiva aporta agua almacenada en el suelo, mientras que el déficit restante puede ser cubierto mediante riego. La Figura 3 muestra de manera esquemática la relación entre la evapotranspiración de referencia, el coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo, la precipitación efectiva y el requerimiento de riego utilizado para diferenciar los componentes verde y azul del consumo hídrico.

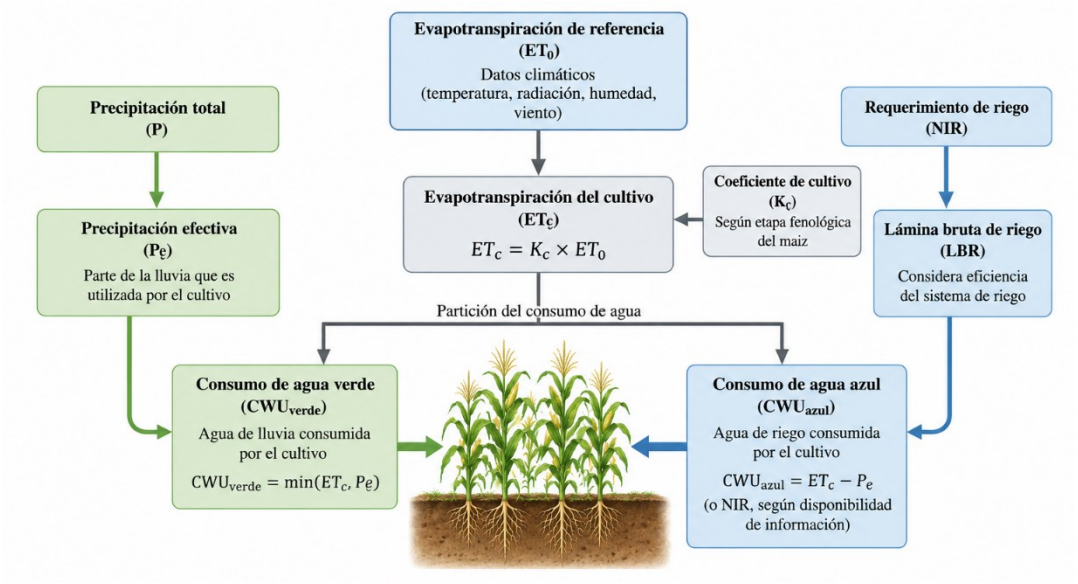


Figura 3 Relación entre evapotranspiración, precipitación efectiva, requerimiento de riego y los componentes verde y azul de la huella hídrica agrícola.

Fuente: Allen et al. (1998) y Hoekstra et al. (2011).

La importancia del balance temporal queda demostrada por Mekonnen y Hoekstra (2011), quienes estimaron las huellas verde y azul de 126 cultivos utilizando un modelo dinámico de balance hídrico con resolución diaria. El modelo consideró las características del suelo y las condiciones climáticas correspondientes a cada ubicación para determinar el consumo hídrico durante el periodo de crecimiento. Esto confirma que la huella hídrica no depende exclusivamente de la precipitación total anual o de la lámina total de riego, sino de la coincidencia temporal entre disponibilidad de agua y necesidades del cultivo.

Una herramienta utilizada ampliamente para estimar estos requerimientos es **CROPWAT 8.0**, desarrollado por la FAO. El programa calcula los requerimientos de agua y de riego utilizando información climática, características del cultivo y propiedades del suelo, y permite desarrollar balances diarios de humedad. Sus procedimientos se fundamentan principalmente en el documento FAO 56 para evapotranspiración y en las metodologías de respuesta de los cultivos al agua (FAO, s. f.).

CROPWAT permite incorporar información climática mensual, decenal o diaria, calcular ET_0, determinar precipitación efectiva y estimar los requerimientos de agua y riego. Cuando no existen datos climáticos locales, puede utilizarse la base CLIMWAT; sin embargo, la propia FAO señala que los valores predeterminados y bases globales deben utilizarse principalmente cuando no existe información local disponible. Cuando existen datos representativos del área estudiada, éstos pueden incorporarse directamente al modelo.

Este último aspecto es relevante para la presente investigación. Debido a que los distritos de riego analizados se encuentran en diferentes localidades del Estado de México, la selección de información meteorológica representativa de cada distrito puede mejorar la capacidad del modelo para reproducir las condiciones reales de producción. Estudios sobre maíz muestran que las diferencias en las estimaciones de evapotranspiración y en los rendimientos utilizados pueden modificar de manera considerable el valor final de la huella hídrica; una investigación específica encontró variaciones de hasta 15 % entre métodos de estimación de evapotranspiración y diferencias aún mayores al combinar distintas estimaciones de rendimiento (Van der Laan et al., 2019).

2.2.3 Huella hídrica del maíz, rendimiento y productividad del agua

El maíz constituye uno de los cultivos con mayor participación en la huella hídrica agrícola mundial debido tanto a la superficie destinada a su producción como al volumen producido. Mekonnen y Hoekstra (2011) estimaron que durante el periodo 1996–2005 la producción global de maíz generó una huella hídrica total aproximada de 770 km³ anuales. Para el producto primario reportaron una huella

media mundial cercana a **1,222 m³/t**, integrada aproximadamente por 947 m³/t de agua verde, 81 m³/t de agua azul y 194 m³/t de agua gris.

Estos valores deben utilizarse únicamente como referencia y no como estándares universales de eficiencia. Las condiciones climáticas, los sistemas de producción y, particularmente, los rendimientos agrícolas provocan variaciones considerables entre regiones. El propio estudio de Mekonnen y Hoekstra muestra diferencias espaciales importantes en la huella hídrica de los cultivos debido a las condiciones locales y a la productividad alcanzada.

La influencia del rendimiento se explica directamente por la estructura del indicador:

$$HH_{cultivo} = \frac{CWU}{Y}$$

Un incremento en el rendimiento puede reducir la huella expresada en m^3/taun cuando el consumo de agua por hectárea permanezca constante. Por esta razón, una menor huella hídrica por tonelada no significa necesariamente que se utilice una menor cantidad absoluta de agua por superficie. Para una interpretación adecuada resulta conveniente analizar simultáneamente el consumo en m^3/ha, el rendimiento en t/hay la huella unitaria en m^3/t.

La importancia de utilizar información representativa de rendimiento ha sido documentada específicamente en maíz. Van der Laan et al. (2019) compararon diferentes métodos para estimar evapotranspiración y rendimiento y obtuvieron huellas hídricas comprendidas aproximadamente entre 338 y 680 m³/t dependiendo de los datos utilizados. Los autores señalan que los errores o la falta de representatividad en evapotranspiración y rendimiento pueden transmitirse directamente al cálculo de la huella y posteriormente ampliarse cuando los resultados se extrapolan regionalmente.

Desde una perspectiva de gestión, reducir la huella hídrica unitaria puede interpretarse como un incremento de la productividad del agua cuando ambos indicadores emplean los mismos límites y volúmenes de consumo. Mekonnen y

Hoekstra (2014) consideran precisamente que mejorar la productividad hídrica en agricultura implica reducir el volumen de agua requerido por unidad de producción y proponen valores de referencia o *benchmarks* para identificar posibilidades de mejora entre productores y regiones.

Sin embargo, para esta investigación resulta útil diferenciar entre la huella hídrica, expresada como volumen de agua por unidad de producto, y la productividad del agua, que puede expresarse como "la cantidad de producto o valor económico generado por unidad del recurso". Esta distinción permite analizar la relación entre el rendimiento agrícola y la huella hídrica del maíz, considerando las condiciones climáticas de referencia utilizadas para los distritos de riego seleccionados. Posteriormente, la incorporación del precio medio rural permite ampliar esta comparación hacia una dimensión económica, mediante la estimación de la productividad aparente del agua, calculada a partir de los componentes azul y verde de la huella hídrica.

2.3 Economía y productividad del agua en la agricultura

El análisis del uso del agua en la agricultura no se limita a determinar el volumen empleado durante la producción. Debido a que el agua constituye un recurso natural limitado y participa directamente como factor de producción, su utilización también puede analizarse desde una perspectiva económica. Esta aproximación resulta particularmente relevante en regiones donde distintos usuarios compiten por el recurso y donde los volúmenes disponibles pueden limitar la expansión o intensidad de las actividades agrícolas.

Desde la economía de los recursos naturales, el valor del agua no debe confundirse necesariamente con el precio o tarifa que pagan los usuarios. Young y Loomis (2014) señalan que, a diferencia de numerosos bienes comercializados en mercados convencionales, el agua presenta características que dificultan que su precio observado refleje completamente los beneficios derivados de su utilización. Por esta razón se han desarrollado métodos específicos para estimar su valor económico en usos agrícolas, urbanos, industriales y ambientales.

En la agricultura, el análisis económico puede realizarse desde diferentes perspectivas. Una de ellas consiste en conocer cuánto producto o valor económico se genera por unidad de agua utilizada; otra busca determinar el aporte marginal del recurso al valor de la producción. Aunque ambos enfoques relacionan agua y actividad económica, representan conceptos diferentes. La productividad económica expresa el valor obtenido por unidad de agua, mientras que el valor marginal trata de identificar cuánto cambia el beneficio o valor de la producción ante una modificación adicional en la disponibilidad del recurso.

Esta diferenciación resulta necesaria para la presente investigación, debido a que la huella hídrica proporciona información sobre el volumen de agua asociado con la producción de maíz, mientras que los indicadores económicos permiten conocer el valor generado a partir de dicho consumo. La integración de ambas dimensiones facilita la comparación de los distritos de riego y evita interpretar la eficiencia únicamente a partir del volumen utilizado.

La relación entre el uso del agua y los resultados económicos de la producción agrícola puede analizarse de manera conjunta mediante indicadores físicos y económicos. El consumo hídrico y el rendimiento determinan la huella hídrica por unidad de producto, mientras que el rendimiento y el precio del cultivo permiten estimar el valor bruto de la producción. A partir de estas variables es posible obtener indicadores de productividad económica del agua que expresan el valor generado por cada unidad del recurso consumido. La Figura 4 sintetiza la relación existente entre estas variables y muestra la transición desde la dimensión física del uso del agua hacia su análisis económico.

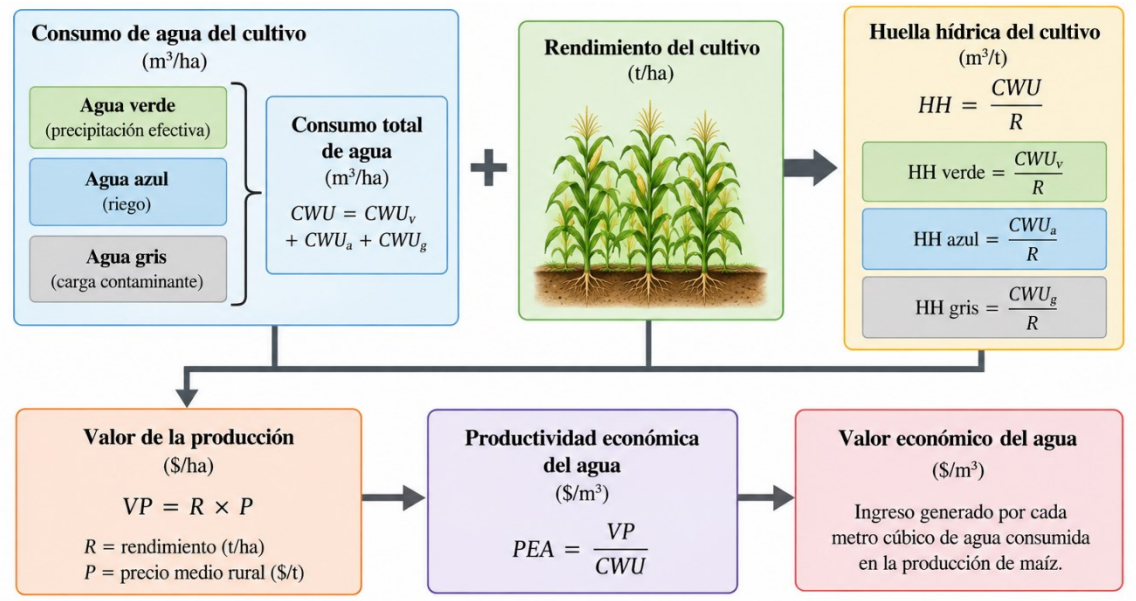


Figura 4 **Relación entre el consumo hídrico, rendimiento, huella hídrica y productividad económica del agua en la producción del maíz.**

Fuente: Hoekstra et al. (2011), Molden et al. (2010) y Young y Loomis (2014)

2.3.1 Valor económico del agua en la agricultura

El agua posee valor económico en la agricultura debido a su contribución al proceso productivo y a su condición de recurso limitado. Cuando la disponibilidad del agua restringe la producción, disponer de una unidad adicional puede generar beneficios económicos al permitir incrementar el rendimiento, ampliar la superficie cultivada o destinar el recurso hacia actividades con mayores retornos. El valor económico depende, por tanto, de las condiciones productivas, del cultivo, de la disponibilidad local, de los costos de producción y de las oportunidades alternativas de utilización del recurso (Young & Loomis, 2014).

Esta interpretación permite distinguir entre **precio del agua y valor económico del agua**. Las cuotas que se pagan por los servicios de riego generalmente se encuentran relacionadas con los costos de operación, conservación y administración de la infraestructura, mientras que el valor económico representa el beneficio atribuible al recurso dentro del proceso productivo. En consecuencia,

la tarifa pagada por un productor no necesariamente corresponde con el valor que tendría una unidad adicional de agua para la producción agrícola.

Un elemento central para comprender el valor económico del agua es su costo de oportunidad. Cuando el recurso es escaso y existen diferentes alternativas de aprovechamiento, destinar una unidad de agua a una actividad implica renunciar a los beneficios que podría generar en otro uso. Por esta razón, el valor económico del agua depende no solamente del costo necesario para captarla, conducirla o suministrarla, sino también de su disponibilidad, de los usos alternativos existentes y de la contribución que realiza al proceso productivo. Hanemann (2005) señala que estas características distinguen al agua de numerosos bienes convencionales y hacen que su valoración dependa fuertemente del lugar, momento y condiciones institucionales bajo las cuales se utiliza.

Desde la economía de los recursos hídricos, la escasez también plantea un problema de asignación. Griffin (2016) explica que el análisis económico del agua requiere considerar cómo un recurso limitado se distribuye entre diferentes actividades y cómo cambian los beneficios asociados con modificaciones en su disponibilidad. Esta perspectiva permite distinguir entre el valor medio generado por el agua y su valor marginal. En consecuencia, un indicador expresado como pesos de producción por metro cúbico permite comparar la productividad económica observada entre sistemas productivos, pero no constituye automáticamente una estimación del precio sombra, del costo de oportunidad ni del valor marginal del recurso.

Esta diferencia ha sido estudiada específicamente en el Estado de México. Zetina-Espinosa et al. (2013) analizaron el Distrito de Riego 044 Jilotepec mediante un modelo de programación lineal orientado a optimizar el patrón de cultivos y determinar el valor del producto marginal del agua. Los autores señalaron que las cuotas pagadas por los usuarios no reflejaban necesariamente el valor de escasez del recurso y estimaron valores diferentes dependiendo del ciclo agrícola y del escenario de disponibilidad considerado.

Este antecedente resulta particularmente relevante para la presente investigación debido a que el DR 044 forma parte de los distritos de riego seleccionados para el análisis. Además, demuestra que el valor económico del agua puede cambiar dependiendo de las condiciones de producción y disponibilidad. En el estudio mencionado, el valor marginal estimado fluctuó entre 0.96 y 5.72 pesos por m^3 para el ciclo otoño–invierno y entre 0.03 y 0.21 pesos por m^3 para primavera–verano durante el año agrícola analizado, lo que evidencia que no existe un único precio económico aplicable a todos los cultivos, periodos o regiones (Zetina-Espinosa et al., 2013).

A escala nacional también se han realizado estimaciones sobre el aporte económico del agua utilizada para riego. Montesillo-Cedillo (2023), mediante un modelo econométrico aplicado al periodo 1980–2017, estimó la contribución del agua al valor de la producción agrícola bajo riego en México. Los resultados mostraron una tendencia creciente, desde aproximadamente 0.39 pesos por m^3 en 1980 hasta 1.92 pesos por m^3 en 2017, expresados en pesos constantes de 2013. El autor señala además la necesidad de realizar estimaciones a escalas más específicas, como Distrito de Riego, Unidad de Riego, estado, presa o cuenca, debido a las diferencias existentes entre sistemas productivos.

Estos antecedentes muestran que la valoración económica del agua debe realizarse considerando las condiciones particulares del sistema estudiado. Por esta razón, trasladar directamente a los Distritos de Riego del Estado de México un precio económico obtenido en otro cultivo, región o periodo puede producir una interpretación incorrecta. Para fines comparativos, resulta más apropiado utilizar indicadores construidos a partir de las condiciones productivas observadas en cada distrito y diferenciar claramente dichos indicadores de una estimación formal del precio sombra del recurso.

2.3.2 Productividad física y económica del agua

La productividad del agua constituye un enfoque complementario a la valoración económica y permite relacionar los resultados obtenidos durante la producción con el volumen de agua utilizado. La FAO define la productividad del agua como

la cantidad o el valor del producto obtenido por unidad de agua consumida o desviada, por lo que el numerador puede expresarse en términos físicos, como kilogramos de producto, o económicos, mediante el valor monetario generado (FAO, 2003).

En términos físicos, la productividad del agua puede representarse mediante:

$$PFA = \frac{Y}{CWU}$$

donde:

PFA= productividad física del agua;

Y= producción o rendimiento;

CWU= volumen de agua consumido por el cultivo.

Cuando el rendimiento se expresa en kilogramos por hectárea y el consumo de agua en metros cúbicos por hectárea, el resultado se obtiene en kg/m^3. Este indicador permite interpretar de manera directa cuánta producción se obtiene por cada metro cúbico utilizado. La FAO destaca que este concepto puede evaluarse utilizando diferentes límites del sistema, por lo que es indispensable especificar si el denominador corresponde a evapotranspiración, agua consumida o agua suministrada para riego (FAO, 2003).

Por otra parte, la productividad económica del agua relaciona el valor obtenido durante el proceso productivo con el volumen del recurso utilizado:

$$PEA = \frac{VP}{V_{agua}}$$

donde:

PEA= productividad económica del agua;

VP= valor de la producción;

V_{agua}= volumen de agua considerado.

Cuando se dispone del rendimiento Yy del precio medio rural PMR, el valor bruto de la producción por hectárea puede estimarse mediante:

$$VBP = Y \times PMR$$

y, posteriormente:

$$PEA = \frac{VBP}{CWU}$$

obteniéndose un resultado expresado en pesos por metro cúbico $(\$/m^3)$.

Este indicador no representa el precio del agua ni su valor marginal. Su interpretación corresponde al **valor bruto generado por unidad de agua consumida**. Esta distinción es importante porque permite comparar el desempeño económico entre distritos de riego sin afirmar que el resultado representa cuánto debería cobrarse por el recurso.

La literatura mexicana muestra aplicaciones de este tipo de indicadores. Ríos Flores et al. (2015), al analizar cultivos forrajeros en el Distrito de Riego 017 Comarca Lagunera, combinaron indicadores de huella hídrica con productividad física y económica del agua. Sus resultados mostraron diferencias entre cultivos tanto en volumen requerido por unidad producida como en ingreso generado por metro cúbico empleado, evidenciando que un menor consumo por kilogramo puede acompañarse de una mayor productividad económica.

Esta aproximación resulta especialmente útil para la presente investigación porque permite complementar la huella hídrica del maíz con indicadores económicos relacionados con el valor comercial de la producción. Para ello, se consideró la productividad aparente del agua, estimada mediante la relación entre el precio medio rural y la suma de los componentes azul y verde de la huella hídrica. Asimismo, se determinó el valor bruto de la producción por hectárea a partir del rendimiento agrícola y el precio medio rural. Estos indicadores permiten comparar los resultados económicos entre los distritos de riego analizados,

aunque no representan una estimación directa de la rentabilidad neta ni del valor marginal del agua.

2.3.3 Valor marginal, precio sombra y aplicación a los Distritos de Riego

El concepto de precio sombra es utilizado en economía para representar el valor marginal de un recurso cuando éste actúa como una restricción dentro de un problema de asignación. En agricultura, puede interpretarse como el cambio en el valor de la función objetivo asociado con disponer de una unidad adicional de agua, bajo las condiciones y restricciones establecidas en el modelo. Su estimación se realiza frecuentemente mediante programación matemática, modelos econométricos o métodos residuales y requiere información sobre producción, costos, restricciones y disponibilidad de factores.

En consecuencia, el precio sombra no debe considerarse como una cifra fija aplicable independientemente del lugar o cultivo. Zetina-Espinosa et al. (2013), por ejemplo, obtuvieron diferentes valores marginales del agua dentro del mismo DR 044 dependiendo del ciclo y de las restricciones analizadas. Para obtenerlos utilizaron un modelo de programación lineal con 37 actividades agrícolas y 62 restricciones, demostrando que la valoración marginal depende directamente de la estructura del sistema productivo considerado.

Otros estudios mexicanos también reportan diferencias importantes. Montesillo-Cedillo (2023), al revisar antecedentes de valoración del agua de riego, señala estimaciones obtenidas mediante distintos métodos y para diferentes regiones agrícolas. Los resultados varían según la tecnología de riego, cultivo, disponibilidad de agua y metodología empleada, lo que confirma que el valor marginal debe estimarse específicamente para el sistema que se pretende analizar.

Esta consideración tiene implicaciones directas para la presente investigación. El propósito principal consiste en comparar la huella hídrica y el desempeño económico de la producción de maíz entre cuatro distritos de riego, pero el estudio no incorpora un modelo de optimización que permita obtener el precio sombra del agua de cada distrito. Por lo tanto, resulta metodológicamente más

apropiado utilizar indicadores económicos construidos a partir del precio medio rural, el rendimiento agrícola y la huella hídrica consuntiva, mediante la estimación de la productividad aparente del agua y el valor bruto de la producción, sin considerar estos resultados como una estimación del valor marginal del recurso.

De esta forma, la evaluación económica puede concentrarse en comparar el valor comercial de la producción de maíz por unidad de agua consuntiva estimada en cada distrito, mediante la productividad aparente del agua. Esta aproximación permite relacionar los componentes azul y verde de la huella hídrica con el rendimiento agrícola y el precio medio rural, mientras que el valor bruto de la producción por hectárea complementa el análisis económico de los distritos seleccionados. Sin embargo, los indicadores obtenidos no representan directamente la rentabilidad neta ni el valor marginal del agua, debido a que no se consideran los costos de producción ni se estima la contribución económica de una unidad adicional del recurso.

2.4 Antecedentes empíricos de la huella hídrica agrícola y del maíz

Los estudios sobre huella hídrica agrícola se han desarrollado a diferentes escalas, desde evaluaciones globales hasta análisis de cultivos y distritos de riego específicos. Uno de los principales antecedentes corresponde a Mekonnen y Hoekstra (2011), quienes estimaron los componentes verde, azul y gris de 126 cultivos para el periodo 1996–2005. Para el maíz obtuvieron una huella hídrica media mundial de aproximadamente 1,222 m^3/t, integrada por 947 m^3/t de agua verde, 81 m^3/t de agua azul y 194 m^3/t de agua gris. Los autores mostraron, además, una considerable variabilidad espacial en los resultados, asociada con diferencias en clima, rendimiento y condiciones de producción, lo que evidencia la importancia de realizar estimaciones regionales en lugar de utilizar promedios globales como referencia directa.

Investigaciones posteriores han confirmado que la huella hídrica del maíz puede cambiar de manera importante dependiendo de la escala y de la información utilizada. Van der Laan et al. (2019) analizaron específicamente la sensibilidad

de la huella hídrica del maíz ante diferentes métodos de estimación de evapotranspiración y mediciones de rendimiento. Encontraron diferencias de hasta 15 % entre métodos para estimar la evapotranspiración estacional, mientras que la variabilidad espacial del rendimiento alcanzó aproximadamente 42 %. Al combinar ambos factores, las estimaciones de huella hídrica oscilaron entre 338 y 680 m³/t. Estos resultados muestran que la representatividad de las variables climáticas y productivas puede modificar considerablemente el valor final del indicador y que la utilización de valores promedio debe justificarse cuidadosamente.

La variabilidad espacial y temporal también ha sido estudiada mediante modelos de simulación de mayor resolución. Mialyk et al. (2022), utilizando el modelo global ACEA para el periodo 1986–2016, estimaron una huella hídrica consuntiva media mundial del maíz de 728 m³/t para 2012–2016, compuesta principalmente por agua verde. Para México estimaron aproximadamente 1,252.4 m³/t, un valor superior al observado en varios de los principales países productores. No obstante, estos resultados no son directamente comparables con la huella total que incorpora el componente gris, ya que el modelo utilizado por los autores considera componentes consuntivos verdes y azules. El estudio resulta útil porque demuestra que incluso para un mismo cultivo los resultados varían en función del periodo analizado, el modelo empleado y las condiciones regionales de producción.

En México también se han desarrollado aplicaciones de la huella hídrica a escala de Distrito de Riego. El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua documentó distintos estudios de caso en *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. En el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, Magaña-Zamora et al. (2017) estimaron la huella hídrica azul de los cultivos producidos durante 2014, diferenciando entre agua superficial y subterránea. La huella azul total anual alcanzó 287.39 hm³, de los cuales 58 % correspondió a agua superficial y 42 % a agua subterránea. Además, seis cultivos —entre ellos el maíz— concentraron alrededor de 96 % de la huella azul total. Este antecedente muestra la

importancia de analizar no solamente el volumen de agua consumido, sino también la fuente de abastecimiento y la distribución del consumo entre cultivos y unidades territoriales.

Un antecedente reciente y particularmente cercano a la presente investigación es el trabajo de Botello-Aguillón et al. (2024), quienes estimaron la huella hídrica agrícola del DR 011 Alto Río Lerma para el año agrícola 2020–2021 utilizando la metodología de Hoekstra et al. (2011). Los autores analizaron 14 cultivos y encontraron diferencias importantes entre módulos de riego. En el caso del maíz grano, los valores unitarios reportados se situaron aproximadamente entre 0.5 y 0.7 dam³/t según el módulo analizado. Asimismo, el maíz representó 43.4 % de la huella hídrica de la producción agrícola del distrito y 52.8 % de su producción total. Los resultados muestran que la comparación dentro de un mismo Distrito de Riego permite identificar diferencias relacionadas con rendimiento, manejo agrícola y aplicación del riego.

Gómez Garcilazo (2026) estimó los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del maíz grano en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro, utilizando información correspondiente al periodo 2000–2023. Para determinar los requerimientos hídricos del cultivo se emplearon los programas CLIMWAT 2.0 y CROPWAT 8.0, además de información agrícola oficial. Los resultados mostraron diferencias en la huella hídrica durante el periodo analizado, relacionadas con las condiciones de producción y los rendimientos agrícolas. Este antecedente resulta relevante para la presente investigación porque permite conocer la aplicación de una metodología similar en otro distrito de riego de México, aunque las diferencias en los periodos y condiciones de estudio deben considerarse al comparar los resultados.

Otro aspecto relevante de estos antecedentes es la incorporación gradual de indicadores económicos. En el estudio del DR 011, el análisis de la huella hídrica fue relacionado con variables de productividad y con el valor generado por el uso del recurso. Magaña-Zamora et al. (2017) utilizó la productividad aparente del agua, expresada en pesos por metro cúbico, para relacionar el precio de mercado

del cultivo con su contenido de agua. Los propios autores aclaran que este indicador constituye una aproximación económica asociada con la huella hídrica y no una valoración integral del recurso. Esta distinción coincide con el enfoque propuesto para la presente investigación, donde la dimensión económica se orienta a comparar el valor generado por unidad de agua y no a estimar directamente el valor total o precio sombra del recurso.

Los antecedentes revisados muestran dos elementos importantes. Primero, la huella hídrica del maíz presenta una variabilidad considerable entre países, regiones, Distritos de Riego e incluso entre módulos pertenecientes a un mismo distrito. Segundo, esta variabilidad no depende exclusivamente de las necesidades fisiológicas del cultivo, sino de la interacción entre clima, disponibilidad de agua, evapotranspiración, rendimiento y manejo productivo. Por esta razón, las estimaciones obtenidas para otras regiones constituyen referencias útiles, pero no deben trasladarse directamente a los Distritos de Riego del Estado de México.

En México, Peñaloza-Sánchez et al. (2020) estimaron las huellas hídricas verde, azul y gris de cebolla y tomate de cáscara en Atlixco, Puebla, empleando CROPWAT 8.0 e información climática, de rendimiento y de manejo obtenida en la región. Los autores encontraron diferencias entre cultivos y ciclos agrícolas, asociadas principalmente con las condiciones climáticas estacionales y los rendimientos alcanzados. Este antecedente resulta relevante porque demuestra que aun dentro de una misma región las modificaciones temporales en la disponibilidad de agua y en la productividad pueden alterar considerablemente la huella obtenida. Por ello, la selección del periodo de análisis y de información productiva representativa constituye un elemento fundamental en las comparaciones regionales de huella hídrica (Peñaloza-Sánchez et al., 2020).

La incorporación de indicadores económicos también ha sido aplicada en investigaciones agrícolas mexicanas. Ríos-Flores y Navarrete-Molina (2017) analizaron conjuntamente la huella hídrica y diferentes indicadores de productividad económica del agua en el cultivo de nogal pecanero en Coahuila,

comparando sus resultados con el Distrito de Riego 017. El estudio mostró que las diferencias en volumen de agua utilizado por unidad producida pueden acompañarse de diferencias importantes en productividad física, ingresos, ganancias y rentabilidad. Este tipo de análisis evidencia que la evaluación del desempeño hídrico puede ampliarse mediante indicadores económicos, siempre que se mantenga la distinción conceptual entre la productividad generada por unidad de agua y el valor económico marginal del recurso (Ríos-Flores & Navarrete-Molina, 2017).

En este contexto, se identifica una oportunidad de investigación a escala regional. Los estudios encontrados muestran avances en la estimación de la huella hídrica agrícola en México y existen antecedentes específicos para distritos de riego del centro del país. Sin embargo, resulta pertinente ampliar este tipo de evaluaciones mediante la comparación de diferentes distritos y la incorporación de indicadores económicos relacionados con la producción agrícola. Por ello, la presente investigación se enfoca en los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088 del Estado de México, considerando la relación entre la huella hídrica del maíz grano, el rendimiento agrícola y el valor comercial de la producción durante el ciclo agrícola 2023–2024.

2.5 Literatura citada

Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. Water Resources Management, 24, 941–958. doi: 10.1007/s11269-009-9480-8.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Botello-Aguillón, C., Valdivia Alcalá, R., Sangerman-Jarquín, D. M., Hernández Ortiz, J., Gutiérrez García, F. G., & Sandoval Romero, F. (2024). Estimación de la huella hídrica agrícola del DR 011, alto río Lerma. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15*(6), e3319. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3319.

Comisión Nacional del Agua. (2025). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. Gobierno de México.

Diario Oficial de la Federación. (2026). *Programa Nacional Hídrico 2026–2030*. Secretaría de Gobernación.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). *Unlocking the water potential of agriculture*. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Systems at breaking point (SOLAW 2021). https://doi.org/10.4060/cb7654en

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). *CROPWAT 8.0*. Land and Water Division.

Gómez Garcilazo JJ, Valdivia Alcalá R, Garay Jácome ÁS, Hernández Ortíz J, Gallegos David A. 2026. Estimation of the water footprint of grain maize (Zea mays L.) production. Agro Productividad. https://doi.10.32854/taf12724

Griffin, R. C. (2016). Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects (2nd ed.). MIT Press.

Hanemann, W. M. (2005). The economic conception of water. University of California, Berkeley. https://doi.org/10.22004/ag.econ.120463

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan. https://doi.org/10.4324/9781849775526

International Organization for Standardization. (2014). Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines *(ISO 14046:2014).*

Magaña-Zamora, J. D., Ortiz-Aguilar, T. Ll., & Hernández-Gen, J. (2017). La huella hídrica de productos agrícolas de la subcuenca Salamanca. En R. Vázquez del Mercado Arribas & J. Lambarri Beléndez (Eds.), *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas* (pp. 175–206). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Maraveles-Delgado, J. A., García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., & Botello-Aguillón, C. (2025). Efectos de la Política de Precios de Garantía y del Programa de Fertilizantes sobre la producción de maíz y el sistema agroalimentario mexicano. https://doi.org/10.15174/au.2025.4439

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences, 15*(5), 1577–1600. doi: 10.5194/hess-15-1577-2011.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators, 46*, 214–223. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.06.013.

Mialyk, O., Schyns, J. F., Booij, M. J., & Hogeboom, R. J. (2022). Historical simulation of maize water footprints with a new global gridded crop model ACEA. *Hydrology and Earth System Sciences, 26*, 923–940. https://doi.org/10.5194/hess-26-923-2022.

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution.

Agricultural Water Management, 97(4), 528–535. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023.

Montesillo-Cedillo, J. L. (2016). Rendimiento por hectárea del maíz grano en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa, 398*, 60–74. https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.04.005.

Montesillo-Cedillo, J. L. (2023). Valor del agua en la producción agrícola bajo riego en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14*(8), e2715. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.2715.

Peñaloza-Sánchez, A. M., Bustamante-González, Á., Vargas-López, S., Jaramillo-Villanueva, J. L., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Huella hídrica de los cultivos de cebolla (Allium cepa L.) y tomate de cáscara (Physalis ixocarpa Brot.) en la región de Atlixco, Puebla, México. Tecnología y Ciencias del Agua, 11(5), 1–30. doi: 10.24850/j-tyca-2020-05-01.

Perry, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail? Agricultural Water Management, 134, 119–125. doi: 10.1016/j.agwat.2013.12.004.

Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, 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, 47*(1), 93–107.

Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2017). Huella hídrica y productividad económica del agua en nogal pecanero (Carya illinoinensis) al suroeste de Coahuila, México. Estudios de Economía Aplicada, 35(3), 697–716.

Romero-Padilla, A., Hernández-Juárez, M., & Espinosa Herrera, J. M. (2024). Pérdida de superficie agrícola en los distritos de riego del Estado de México y patrones de crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas*, (115). https://doi.org/10.14350/rig.60863.

Van der Laan, M., Jarmain, C., Bastidas-Obando, E., Annandale, J. G., Fessehazion, M., & Haarhoff, D. (2019). Are water footprints accurate enough to

be useful? A case study for maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Water Management, 213*, 512–520. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.026.

Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (Eds.). (2017). *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: Concepts and methods* (2nd ed.). RFF Press/Routledge.

Zetina-Espinosa, A. M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., Cruz-Jiménez, J., & Téllez-Delgado, R. (2013). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 10*(2), 139–156.

CAPÍTULO 3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ EN LOS DISTRITOS DE RIEGO DEL ESTADO DE MÉXICO[3]

Diego Armando Dolores-Cantú[1], (https://orcid.org/0009-0002-9188-6704)

Dr. Ramón Valdivia-Alcalá[1*], (https://orcid.org/0000-0003-0434-3169)

Dra. Ma. Magdalena Sánchez-Astello[2], (https://orcid.org/0000-0001-5957-594X)

Dr. Juan Hernández-Ortiz[3], (https://orcid.org/0000-0002-4108-4744)

Dr. Fermín Sandoval-Romero[4], (https://orcid.org/0000-0002-4108-4744)

[1]Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

[*]Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com, tel. +52 595 951 7058

RESUMEN

La evaluación de la huella hídrica y el valor comercial del maíz permite comparar sistemas agrícolas desde una perspectiva hídrica y económica. El objetivo fue estimar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del maíz grano (Zea mays L.) y determinar indicadores económicos asociados en los distritos de riego (DR) 033, 044, 073 y 088 del Estado de México. Se utilizaron estadísticas agrícolas del año agrícola 2023–2024, correspondientes al ciclo primavera-verano, información climática histórica de CLIMWAT 2.0 y el programa CROPWAT 8.0 para estimar los requerimientos hídricos. Los DR 033 y 044 se representaron con la estación Toluca, y los DR 073 y 088 con Chapingo, por su correspondencia aproximada con las condiciones climáticas regionales. La huella hídrica gris se estimó con una dosis común de fertilización nitrogenada de referencia de FIRA y una fracción de lixiviación de 0.10. Los rendimientos variaron de 4.2 a 7.6 t ha^{-1}; la huella hídrica total fue de 1261.19, 999.43, 813.33 y 802.63 m^3 t^{-1} para los DR 033, 044, 073 y 088, respectivamente. El componente verde representó la mayor proporción de la huella hídrica total. La productividad aparente del agua fue de 9.05, 6.62, 7.49 y 7.88 MXN m^{-3}, respectivamente. El DR 033 obtuvo la mayor productividad aparente, aunque registró el rendimiento más bajo y la huella hídrica total más alta. El DR 088 presentó el mayor valor bruto de la producción por hectárea, con 31 540 MXN ha^{-1}. Los resultados muestran que el precio medio rural influye en la comparación económica entre distritos. Las estimaciones representan condiciones climáticas y de fertilización de referencia

[3] Artículo enviado a la revista: Revista Agro Productividad

Palabras clave: Zea mays L, rendimiento agrícola, evapotranspiración, precipitación efectiva, fertilización nitrogenada, precio medio rural

3.1 Introducción

El cultivo de maíz (Zea mays L.) es uno de los principales cultivos agrícolas en México debido a su importancia alimentaria, económica y social. Su producción depende del clima, de la cantidad de agua disponible y de la forma en que se cultiva. En los sistemas que utilizan el agua de riego, evaluar el aprovechamiento del recurso hídrico resulta particularmente importante para relacionar los requerimientos de agua con la producción obtenida. Mekonnen y Gerbens-Leenes (2020) señalan que la producción de alimentos representa una parte importante de la huella hídrica mundial, por lo que su evaluación constituye una herramienta para analizar la sostenibilidad de los sistemas agrícolas.

La huella hídrica (HH) permite cuantificar el consumo de agua dulce y la contaminación potencial asociados con la producción de bienes y servicios. En la agricultura se integra por tres componentes: el verde, que corresponde al agua de lluvia almacenada en el suelo y consumida mediante evapotranspiración; el componente azul, relativo al consumo de agua superficial y subterránea; y la huella hídrica gris, que representa un volumen teórico requerido para asimilar una carga contaminante hasta una concentración de referencia. Hoekstra et al. (2011) y Mekonnen y Hoekstra (2011) explican que estos componentes aportan información complementaria y permiten comparar las demandas hídricas entre cultivos y regiones.

La huella hídrica por tonelada producida varía en función de las condiciones climáticas y los rendimientos agrícolas. Mekonnen y Hoekstra (2014) identificaron diferencias amplias en los valores de referencia de distintos cultivos; Mialyk et al. (2022) documentaron, a escala mundial, cambios históricos en la huella hídrica del maíz vinculados con el rendimiento y la evolución de las superficies cultivadas. Estos antecedentes muestran la importancia de evaluar conjuntamente los volúmenes estimados de consumo y la cantidad de producto obtenida, sin equiparar necesariamente una huella unitaria menor con una mayor eficiencia operativa del riego.

En México se han desarrollado investigaciones relacionadas con el uso agrícola del agua en distritos de riego. Botello-Aguillón et al. (2024) estimaron la huella hídrica de cultivos en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma. Gómez-Garcilazo et al. (2026) estimaron los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del maíz grano en el Distrito de Riego

023, San Juan del Río, Querétaro, utilizando información agrícola y herramientas de estimación de los requerimientos hídricos del cultivo. Garay-Jácome et al. (2025) analizaron los efectos de distintos niveles de sequía sobre el ingreso agrícola y la productividad del agua en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro, mediante programación lineal. Sus resultados mostraron que la reducción de la disponibilidad de agua disminuye el ingreso agrícola e incrementa el precio sombra del recurso. Por su parte, Zetina-Espinosa et al. (2013) estudiaron el valor económico del agua en el DR 044 Jilotepec mediante programación lineal y escenarios de asignación. Aunque estos trabajos emplean procedimientos diferentes, muestran que el análisis de los volúmenes hídricos puede complementarse con indicadores económicos. La presente investigación compara cuatro distritos del Estado de México mediante el enfoque de evaluación de la huella hídrica de Hoekstra et al. (2011), complementado con la productividad aparente del agua y el valor bruto de la producción del maíz grano.

La evaluación económica de la HH puede realizarse mediante la productividad aparente del agua, que relaciona el valor bruto de la producción con el volumen consuntivo estimado. Vázquez del Mercado Arribas y Lambarri Beléndez (2017) desarrollan este enfoque en el contexto de la huella hídrica en México; Hirpa et al. (2023) muestran su aplicación en la comparación económica de cultivos. Este indicador no equivale al precio sombra del agua ni a la rentabilidad, puesto que no estima el valor marginal del recurso ni descuenta los costos de producción. Su utilidad consiste en describir el valor bruto asociado a cada metro cúbico de agua azul y verde consumida según el modelo.

Los distritos 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción y 088 Chiconautla se distribuyen en regiones con distintas condiciones territoriales y productivas. Romero-Padilla et al. (2024) documentaron transformaciones de la superficie agrícola y procesos de crecimiento urbano en los distritos de riego de la entidad. En este contexto, el objetivo de la investigación fue estimar los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica del maíz grano en los cuatro distritos y evaluar la productividad aparente del agua y el valor bruto de la producción, utilizando registros agrícolas del ciclo Primavera-Verano 2023–2024 y condiciones climáticas históricas de referencia. Se examinó si el ordenamiento de los distritos por huella hídrica consuntiva coincidía con el obtenido mediante su productividad aparente.

3.2 Materiales y Métodos

Área de estudio

La investigación se desarrolló en cuatro distritos de riego (DR) ubicados principalmente en las regiones norte, noroeste y nororiente del Estado de México: 033 Estado de México, 044 Jilotepec, 073 La Concepción y 088 Chiconautla (Figura 1). Estas unidades difieren en su localización, superficie agrícola y características productivas. Romero-Padilla et al. (2024) analizaron la pérdida de superficie agrícola en los distritos de riego de la entidad y los patrones territoriales asociados con el crecimiento urbano.

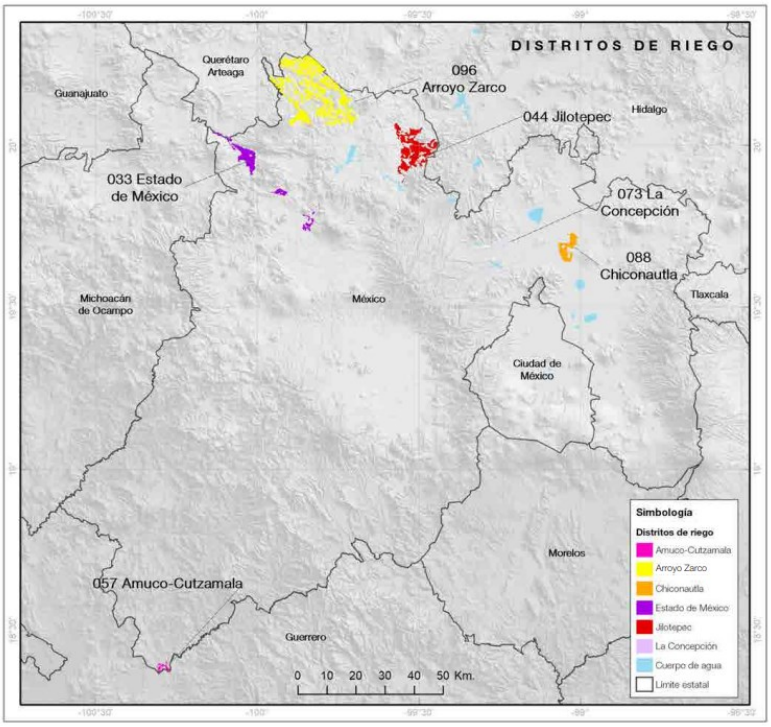


Figura 5 Localización de los cuatro distritos de riego considerados en la evaluación económica de la huella hídrica del maíz en el Estado de México.

Fuente: INEGI

El DR 033 Estado de México comprende áreas agrícolas de los municipios de Temascalcingo, Atlacomulco y Jocotitlán, además de contar con parcelas que se extienden hacia el estado de Querétaro. Por su parte, el DR 044 Jilotepec se localiza principalmente en los municipios de Jilotepec y Soyaniquilpan de Juárez. El DR 073 La Concepción comprende superficies agrícolas de Cuautitlán Izcalli, Tepotzotlán y Teoloyucan, mientras que el DR 088 Chiconautla se distribuye en municipios del norte del Valle de México, entre ellos Tecámac y Tonanitla. Romero-Padilla et al. (2024)

señalan que los distritos 073 y 088 se encuentran en zonas que han experimentado importantes procesos de crecimiento urbano, situación que ha modificado la distribución de las superficies destinadas a las actividades agrícolas.

Para el análisis se consideró al cultivo de maíz grano (*Zea mays L.)* del ciclo agrícola Primavera-Verano 2023–2024, en donde se utiliza el riego. De acuerdo con los datos agrícolas utilizados en la investigación, la superficie sembrada de maíz fue de 2635 ha en el DR 033, 530 ha en el DR 044, 10 ha en el DR 073 y 300 ha en el DR 088, con una superficie total de 3475 ha. Estas diferencias en la superficie cultivada, junto con los rendimientos registrados en cada distrito, constituyeron la base para comparar la huella hídrica del maíz y los indicadores económicos considerados.

Fuentes de información y procesamiento de datos

Para el desarrollo de la investigación se utilizó información agrícola y climática procedente de fuentes oficiales. Los datos agrícolas correspondieron al ciclo 2023–2024 y se obtuvieron de las estadísticas de los distritos de riego de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Se consideraron las variables de superficie sembrada, rendimiento agrícola y precio medio rural del maíz grano para los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088. La información se organizó por distrito para identificar las diferencias productivas y económicas entre las áreas de estudio. La CONAGUA dispone de registros agrícolas que permiten consultar estas variables por distrito de riego, cultivo y ciclo agrícola, constituyendo una fuente de información para el análisis de la producción agrícola nacional (CONAGUA, 2025).

La información meteorológica procedió de CLIMWAT 2.0 de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Para representar las condiciones de referencia de los DR 033 y 044 se utilizó la estación Toluca (19.30° N, 99.66° O; 2720 m de altitud), mientras que para los DR 073 y 088 se empleó Chapingo (19.48° N, 98.90° O; 2250 m). La asignación consideró proximidad y correspondencia aproximada con las características térmicas y pluviométricas regionales. Los datos de CLIMWAT corresponden a promedios históricos, no a observaciones específicas de 2023–2024 (FAO, 2025a).

La información climática se procesó mediante el programa CROPWAT 8.0, desarrollado por la FAO para estimar los requerimientos de agua de los cultivos y las necesidades de riego. Este programa utiliza información meteorológica y características del cultivo para calcular la evapotranspiración de referencia, la evapotranspiración del cultivo y la

precipitación efectiva. Los procedimientos de estimación se fundamentan en las metodologías descritas por Allen et al. (1998), particularmente en el método FAO Penman-Monteith para determinar la evapotranspiración de referencia (FAO, 2025b).

Para representar el maíz grano se utilizaron los parámetros de cultivo disponibles en CROPWAT, con una fecha de siembra de referencia del 1 de mayo y una duración de 125 días: 20 días en la etapa inicial, 35 en desarrollo, 40 en la etapa media y 30 en la final. Se adoptaron valores de Kc de 0.30, 1.20 y 0.35 para la etapa inicial, la etapa media y el final del ciclo, respectivamente. Esta parametrización fue común a los cuatro distritos y constituye un supuesto del escenario comparativo. Los Kc pueden requerir ajustes por condiciones climáticas y de humedecimiento del suelo (Allen et al., 1998); por ello, los valores empleados se interpretan como parámetros de referencia, sin atribuirles una validación local para cada distrito.

Cuadro 2. Superficie sembrada, rendimiento agrícola y precio medio rural del maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024.

Distrito de Riego	Superficie	Rendimiento	PMR
	ha	T ha^{-1}	MXN t^{-1}
033 Estado de México	2635	4.2	6900
044 Jilotepec	530	5.3	4000
073 La Concepción	10	7.5	4000
088 Chiconautla	300	7.6	4150

Fuente: Elaboración propia

Estimación de la huella hídrica

La huella hídrica del maíz grano se evaluó considerando sus componentes azul, verde y gris, de acuerdo con el enfoque metodológico desarrollado por Hoekstra et al. (2011). Este indicador permite cuantificar el volumen de agua asociado con la producción agrícola, diferenciando el consumo de agua superficial y subterránea, el aprovechamiento del agua de lluvia y el volumen de agua necesario para asimilar la carga contaminante generada durante el proceso productivo. Mekonnen y Hoekstra (2011) señalan que la estimación de estos componentes permite evaluar la utilización

del recurso hídrico en función de la producción obtenida, expresando los resultados en unidades de volumen de agua por unidad de masa del cultivo.

La huella hídrica total se define mediante la suma de sus tres componentes, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$HH_{total} = HH_{azul} + HH_{verde} + HH_{gris}$$

Donde:

HH_{total} = Huella hídrica total ($m^3\ t^{-1}$).

HH_{azul} = Huella hídrica azul ($m^3\ t^{-1}$).

HH_{verde} = Huella hídrica verde ($m^3\ t^{-1}$).

HH_{gris} = Huella hídrica gris ($m^3\ t^{-1}$).

Los componentes se expresan en metros cúbicos por tonelada de maíz grano producido, lo que permite comparar los valores obtenidos en los cuatro distritos de riego, independientemente de las diferencias en superficie sembrada y volumen de producción.

Huella hídrica azul

La huella hídrica azul se estimó con los resultados del módulo de requerimientos de agua del cultivo (RAC) de CROPWAT 8.0. Se utilizaron la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la precipitación efectiva (Pe) de cada periodo de aproximadamente diez días, considerando la duración correspondiente de los periodos parciales al inicio y al final del ciclo. Siguiendo a Hoekstra et al. (2011), la evapotranspiración azul se calculó como la diferencia positiva entre ETc y Pe y se acumuló durante los 125 días del cultivo. Se emplearon estas láminas consuntivas, sin sustituirlas por la lámina bruta de la programación del riego.

La relación se calculó mediante la siguiente expresión:

$$ET_{azul,i} = Máx\left(0, ET_{c,i} - P_{e,i}\right)$$

$$HH_{azul} = \frac{10 \sum_{i=1}^{n} ET_{azul,i}}{R}$$

$ET_{c,i}$ representa la evapotranspiración del maíz (mm) y $P_{e,i}$ la precipitación efectiva (mm) en el periodo i; R es el rendimiento agrícola ($t\ ha^{-1}$). El factor 10 transforma milímetros a metros cúbicos por hectárea.

Huella hídrica verde

La huella hídrica verde se determinó mediante la evapotranspiración del cultivo que puede satisfacerse con la precipitación efectiva en cada periodo de cálculo. Para evitar atribuir al consumo del maíz la lluvia excedente de una década, se utilizó el menor valor entre ETc y Pe (Hoekstra et al., 2011).

$$ET_{verde,i} = min\left(ET_{c,i}, P_{e,i}\right)$$

$$HH_{verde} = \frac{10 \sum_{i=1}^{n} ET_{verde,i}}{R}$$

La suma de los componentes azul y verde representa la evapotranspiración total estimada bajo el supuesto de satisfacción de los requerimientos hídricos. La separación por periodos de aproximadamente diez días se aplicó con el mismo procedimiento a ambas estaciones. Los resultados corresponden a un escenario de referencia y no a una medición de la procedencia real del agua evapotranspirada en cada parcela.

Huella hídrica gris

La huella hídrica gris se estimó a partir de la carga potencial de nitrógeno asociada con la fertilización del maíz, mediante un procedimiento de nivel 1 para contaminación difusa (Hoekstra et al., 2011; Franke et al., 2013). Las dosis procedieron de un paquete de referencia del Sistema de Agrocostos de FIRA para maíz en Valles Altos del Estado de México, ciclo Primavera-Verano 2025, modalidad de labranza de conservación. Se consideraron 150 kg ha^{-1} de fosfonitrato, 250 kg ha^{-1} de fosfato diamónico y 250 kg ha^{-1} de urea; con contenidos de nitrógeno supuestos de 33, 18 y 46 %, la aportación total fue de 209.5 kg N ha^{-1}.

$$HH_{gris} = \frac{\alpha \times N}{(C_{máx} - C_{nat}) \times R}$$

Donde:

HH_{gris} = Huella hídrica gris del cultivo (m³ t^{-1}).

N = Cantidad de nitrógeno aplicado al cultivo (kg ha^{-1}).

α = Fracción de lixiviado y escurrimiento (adim.)

$C_{máx}$ = Concentración máxima admisible del contaminante en el agua (kg m^{-3}).

C_{nat} = Concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (kg m^{-3}).

R = Rendimiento agrícola del maíz grano (t ha^{-1}).

Se adoptó una fracción de lixiviación y escurrimiento de 0.10. El escenario común equivale a una carga potencial de 20.95 kg N ha^{-1} y un volumen de dilución de referencia de 2095 m^3 ha^{-1}. Dado que el paquete FIRA corresponde a 2025 y no se observaron aplicaciones reales de fertilizantes, la huella gris debe interpretarse como una estimación potencial comparable, no como una medición de contaminación del ciclo 2023–2024.

Evaluación económica del agua

La evaluación económica se basó en el precio medio rural (PMR), expresado en pesos mexicanos por tonelada de maíz grano (MXN t^{-1}), y en el rendimiento agrícola, expresado en t ha^{-1}, registrados por CONAGUA. La productividad aparente del agua (PAA) se calculó dividiendo el PMR entre la suma de las huellas hídricas azul y verde, expresadas en m^3 t^{-1}. El componente gris no se incluyó en el denominador, debido a que es un volumen teórico asociado con contaminación y no un consumo adicional de agua (Vázquez del Mercado Arribas y Lambarri Beléndez, 2017; Hirpa et al., 2023).

$$PAA = \frac{PMR}{HHazul + HHverde}$$

La PAA se expresó en MXN m^{-3} y representa valor bruto de producción por unidad de agua consuntiva estimada; no constituye rentabilidad, precio sombra ni beneficio marginal del agua. De manera complementaria, se calculó el valor bruto de la producción por hectárea (VBP) como el producto del rendimiento agrícola y el precio medio rural.

$$VBP = R \times PMR$$

El VBP se expresó en MXN ha^{-1}. No se estimó productividad económica neta porque no se dispone de costos de producción correspondientes a cada distrito en el ciclo 2023–2024.

3.3 Resultados y Discusión

Requerimientos hídricos del cultivo

Los requerimientos hídricos del maíz grano presentaron diferencias entre las estaciones climáticas de referencia. CROPWAT 8.0 estimó una evapotranspiración acumulada del cultivo (ETc) de 320.1 mm para Toluca y de 400.5 mm para Chapingo. La precipitación efectiva acumulada durante el ciclo fue de 396.3 y 348.9 mm, respectivamente. Las condiciones meteorológicas de Toluca se caracterizaron, en esta comparación, por una

menor demanda evapotranspirativa y una mayor precipitación efectiva que las de Chapingo.

Los cálculos por periodos de aproximadamente diez días permitieron separar la evapotranspiración asociada con la lluvia y con el riego. Para Toluca se estimaron 319.4 mm de evapotranspiración verde y 0.8 mm de azul; para Chapingo, 325.6 y 74.9 mm, respectivamente. En Toluca, la suma de los valores redondeados por periodo fue de 320.2 mm, frente a 320.1 mm en el total mostrado por CROPWAT. La separación azul-verde se calculó con las ecuaciones indicadas en Materiales y métodos, a partir de ETc y Pe de cada periodo. Este procedimiento también se aplicó al periodo parcial final de septiembre, en el que se identificó una diferencia respecto a la columna «Req. riego» del programa.

La evapotranspiración del maíz varió entre etapas, con valores máximos durante el desarrollo medio del cultivo. Allen et al. (1998) explican que la evapotranspiración depende tanto de las condiciones meteorológicas como del coeficiente de cultivo correspondiente a cada etapa fenológica. Puesto que se mantuvieron constantes los parámetros del maíz, las diferencias entre estaciones se asociaron principalmente con sus datos climáticos de referencia.

Huella hídrica del maíz en los distritos de riego

La huella hídrica total del maíz grano osciló entre 802.63 y 1261.19 $m^3\ t^{-1}$. El DR 033 presentó el mayor valor, seguido del DR 044, mientras que los valores menores correspondieron a los distritos 073 y 088 (Cuadro 2). Estas diferencias respondieron a los rendimientos agrícolas y a las condiciones meteorológicas de referencia asociadas a las estaciones Toluca y Chapingo. Mekonnen y Hoekstra (2011) identificaron que las huellas hídricas de los cultivos varían según el clima, la productividad y las características de la producción.

Cuadro 3. Huella hídrica azul, verde, gris y total del maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024.

Distrito de riego	HH azul ($m^3\ t^{-1}$)	HH verde ($m^3\ t^{-1}$)	HH gris ($m^3\ t^{-1}$)	HH total ($m^3\ t^{-1}$)
033 Estado de México	1.90	760.48	498.81	1261.19
044 Jilotepec	1.51	602.64	395.28	999.43

073 La Concepción	99.87	434.13	279.33	813.33
088 Chiconautla	98.55	428.42	275.66	802.63

Fuente: Elaboración propia

El componente verde fue el de mayor participación en los cuatro distritos. En los DR 033 y 044 representó aproximadamente 60.3 % de la huella total; el gris, 39.5 %; y el azul, menos de 0.2 %. En los DR 073 y 088, el verde representó cerca de 53.4 %, el gris 34.3 % y el azul 12.3 %. La distribución de los componentes depende de la precipitación efectiva estimada en CROPWAT a partir de los datos de CLIMWAT y de la estimación explícita de la evapotranspiración azul y verde a escala de periodos de diez días.

La baja huella azul obtenida con Toluca indica que la precipitación efectiva histórica cubre casi toda la demanda del maíz bajo el calendario supuesto, pero no implica que el DR 033 o el DR 044 carezcan de riego en la práctica. Tampoco permite inferir su eficiencia operativa o sus volúmenes extraídos de presas y pozos. La huella gris fue calculada con una misma dosis de referencia y una fracción de lixiviación uniforme, de modo que sus diferencias unitarias se relacionaron directamente con el rendimiento de cada distrito (Franke et al., 2013)

Fuentes-López et al. (2026) analizaron la huella hídrica de 17 modalidades de cultivo en el Módulo de Riego 02 Salvatierra, perteneciente al Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, durante el ciclo agrícola 2021–2022. Para el maíz de primavera–verano reportaron una huella hídrica verde de 459 m^3/t y una huella azul de 393 m^3/t, mientras que para el maíz 2C obtuvieron valores de 523 y 276 m^3/t, respectivamente. En comparación, la presente investigación obtuvo una huella hídrica consuntiva, integrada por los componentes azul y verde, comprendida entre 526.97 y 762.38 m^3/t. Sin embargo, estas diferencias deben interpretarse considerando los procedimientos utilizados en cada investigación. Fuentes-López et al. (2026) emplearon registros de volúmenes de riego para estimar el componente azul, mientras que en este estudio se utilizaron estimaciones de evapotranspiración y precipitación efectiva mediante CROPWAT 8.0, con información climática histórica de referencia. Por ello, los resultados permiten identificar diferencias entre los volúmenes estimados por tonelada de maíz, pero no establecer directamente cuál de los sistemas presenta una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua.

Relación entre rendimiento agrícola y huella hídrica

El DR 033 registró el menor rendimiento, de 4.2 t ha^{-1}, y la mayor huella hídrica total (1261.19 m^3 t^{-1}). En contraste, el DR 088 alcanzó el mayor rendimiento, de 7.6 t ha^{-1}, y la menor huella total (802.63 m^3 t^{-1}). Los distritos 044 y 073 presentaron rendimientos de 5.3 y 7.5 t ha^{-1}, respectivamente. La diferencia entre los valores extremos fue de 458.56 m^3 t^{-1}, equivalente a 36.4 % respecto a la huella del DR 033.

La relación inversa entre rendimiento y huella hídrica unitaria debe interpretarse considerando la estructura del indicador. Para los distritos que compartieron una misma estación, se mantuvieron constantes las láminas consuntivas por hectárea y el volumen de referencia de la huella gris; por tanto, la variación por tonelada se originó matemáticamente en los rendimientos. Mekonnen y Hoekstra (2014) reconocen la relevancia del rendimiento en la huella hídrica por unidad de producción, pero nuestros cálculos no permiten atribuir las diferencias a prácticas individuales de riego, fertilización o manejo de parcelas.

Botello-Aguillón et al. (2024) también emplearon indicadores de huella hídrica para comparar cultivos de un distrito mexicano, lo que muestra el valor descriptivo de estos procedimientos. En esta investigación se comparó una sola especie en cuatro distritos; una evaluación posterior de las prácticas productivas requeriría información local de fechas de siembra, variedades, riego efectivamente aplicado y fertilización observada.

Evaluación económica de la huella hídrica

La productividad aparente del agua (PAA) varió entre 6.62 y 9.05 MXN m^{-3}. El DR 033 presentó el mayor valor, seguido de los distritos 088 y 073; el DR 044 registró el menor (Cuadro 3). Las diferencias estuvieron relacionadas con el precio medio rural, el rendimiento y el volumen consuntivo estimado. La PAA expresa valor bruto de producción por unidad de agua azul y verde; no descuenta los costos agrícolas y, por tanto, no equivale a la rentabilidad económica del sistema.

Cuadro 4. Indicadores económicos asociados con la producción de maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México, ciclo agrícola 2023–2024

Distrito de riego	Rend. (t ha^{-1})	PMR (MXN t^{-1})	VBP (MXN ha^{-1})	PAA (MXN m^{-3})
033 Estado de México	4.2	6900	28 980	9.05
044 Jilotepec	5.3	4000	21 200	6.62
073 La Concepción	7.5	4000	30 000	7.49
088 Chiconautla	7.6	4150	31 540	7.88

Fuente: Elaboración propia

El DR 033 presentó una productividad aparente de 9.05 MXN m^{-3} a pesar de registrar el rendimiento más bajo, debido principalmente a su precio medio rural de 6900 MXN t^{-1}, superior al de los demás distritos. El DR 044 obtuvo 6.62 MXN m^{-3} con precio de 4000 MXN t^{-1} y rendimiento de 5.3 t ha^{-1}. En los DR 073 y 088, que compartieron condiciones climáticas de referencia, la diferencia entre las productividades aparentes de 7.49 y 7.88 MXN m^{-3} se relacionó con sus respectivos precios y rendimientos.

El valor bruto de producción por hectárea fue mayor en el DR 088 (31 540 MXN ha^{-1}), seguido de los DR 073 (30 000 MXN ha^{-1}), 033 (28 980 MXN ha^{-1}) y 044 (21 200 MXN ha^{-1}). El DR con mayor VBP no coincidió con aquel de mayor PAA, lo que muestra que ambos indicadores describen dimensiones distintas del desempeño agrícola. Hirpa et al. (2023) destacan la utilidad de combinar productividad hídrica y económica, mientras que Zetina-Espinosa et al. (2013) demuestran que la valoración marginal del agua en el DR 044 exige herramientas económicas diferentes, como programación lineal.

La evaluación económica no constituye una estimación del precio sombra del agua ni del margen neto de los productores. Sus resultados dependen de condiciones meteorológicas históricas y del precio medio rural correspondiente al ciclo analizado; de este modo, proporcionan una comparación descriptiva del valor bruto de la producción por unidad de agua consuntiva modelada, y no una medición de beneficio económico atribuible exclusivamente al riego.

La importancia de incorporar indicadores económicos al análisis de la huella hídrica también fue documentada por Fuentes-López et al. (2026), quienes evaluaron la productividad aparente del agua y de la tierra en 17 modalidades de cultivo del Módulo

de Riego 02 Salvatierra. Para el maíz de primavera–verano obtuvieron una productividad aparente del agua de 19.1 MXN/m³ y un valor bruto de producción de 100,500 MXN/ha, mientras que para el maíz 2C registraron 27.1 MXN/m³ y 95,250 MXN/ha, respectivamente. Los autores también identificaron una relación inversa entre la huella hídrica azul y la productividad aparente del agua. En la presente investigación, este último indicador presentó valores comprendidos entre 6.62 y 9.05 MXN/m³, mientras que el valor bruto de producción varió entre 21,200 y 31,540 MXN/ha. No obstante, los valores de productividad aparente no son directamente comparables, debido a que Fuentes-López et al. (2026) utilizaron únicamente la huella hídrica azul como denominador, mientras que en este estudio se consideró la suma de los componentes azul y verde. A pesar de estas diferencias, ambos trabajos muestran la importancia de incorporar el rendimiento y el precio medio rural para ampliar la interpretación económica de la huella hídrica y evitar que el análisis se limite exclusivamente a los volúmenes de agua estimados.

3.4 Conclusiones

La evaluación de la huella hídrica del maíz grano en cuatro distritos de riego del Estado de México permitió identificar diferencias en los volúmenes estimados por tonelada producida para el ciclo agrícola 2023–2024. La huella hídrica total se situó entre 802.63 y 1261.19 $m^3\ t^{-1}$, con el valor mayor en el Distrito de Riego 033 y el menor en el Distrito de Riego 088. Estas diferencias se relacionaron con los rendimientos agrícolas y con las condiciones climáticas históricas utilizadas como referencia.

El componente verde presentó la mayor proporción de la huella hídrica total, seguido del componente gris y, finalmente, del azul. Los valores muy bajos de huella azul de los distritos representados con Toluca reflejaron la precipitación efectiva histórica bajo el calendario supuesto, sin demostrar que en la práctica requieran poco riego. Asimismo, la huella gris representa una carga potencial de nitrógeno calculada mediante fertilización de referencia y no una medición directa de contaminación.

La productividad aparente del agua se ubicó entre 6.62 y 9.05 MXN m^{-3} y presentó su valor mayor en el Distrito de Riego 033, mientras que el Distrito de Riego 088 obtuvo el mayor valor bruto de producción por hectárea, con 31 540 MXN ha^{-1}. Esta diferencia mostró que la clasificación económica de los distritos depende del indicador utilizado y que el precio medio rural puede modificar la interpretación del desempeño hídrico frente al valor comercial obtenido.

La integración de la huella hídrica y la productividad aparente permitió comparar el consumo hídrico estimado con el valor bruto de la producción. Los resultados están condicionados por el uso de promedios climáticos históricos, parámetros agronómicos comunes y una dosis de fertilización de referencia correspondiente a 2025. Por ello, las estimaciones no permiten determinar volúmenes reales de extracción, rentabilidad neta ni precios sombra del agua.

3.5 Referencias Bibliográficas

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations: Rome, Italy. 300 p.

Botello-Aguillón C, Valdivia Alcalá R, Sangerman-Jarquín DM, Hernández Ortiz J, Gutiérrez García FG, Sandoval Romero F. 2024. Estimación de la huella hídrica agrícola del DR 011, alto río Lerma. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 15 (6): e3319. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3319

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2025. Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México, México.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2025a. CLIMWAT: Climatic database to be used with CROPWAT. FAO: Rome, Italy.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2025b. Crop Water and Irrigation Requirements Program of FAO (CROPWAT). FAO: Rome, Italy.

FIRA (Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura). 2025. Sistema de costos agrícolas. Maíz: Valles Altos, Estado de México, ciclo Primavera-Verano 2025, modalidad labranza de conservación. Resumen de costos y memoria de cálculo. FIRA: México.

Franke NA, Boyacioglu H, Hoekstra AY. 2013. Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines. Value of Water Research Report Series 65. UNESCO-IHE: Delft, The Netherlands.

Garay-Jácome ÁS, Valdivia-Alcalá R, Medellín-Azuara J, Hernández Ortiz J. 2025. Economic effects of drought in Irrigation District 023 San Juan del Río, Querétaro. Agro Productividad 18 (10): 25–33. https://doi.org/10.32854/4a36p027

Gómez Garcilazo JJ, Valdivia Alcalá R, Garay Jácome ÁS, Hernández Ortíz J, Gallegos David A. 2026. Estimation of the water footprint of grain maize (Zea mays L.) production. Agro Productividad. https://doi.org/10.32854/taf12724

Hirpa BA, Adane GB, Asrat A, Nedaw D. 2023. Green, blue and economic water productivity: A water footprint perspective from the Upper Awash Basin, Central Ethiopia. Journal of Water and Climate Change 14 (2): 559–575. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.400

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aldaya MM, Mekonnen MM. 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. Earthscan: London, United Kingdom. 203 p.

Mekonnen MM, Gerbens-Leenes W. 2020. The water footprint of global food production. Water 12 (10): 2696. https://doi.org/10.3390/w12102696

Mekonnen MM, Hoekstra AY. 2011. The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. Hydrology and Earth System Sciences 15 (5): 1577–1600. https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011

Mekonnen MM, Hoekstra AY. 2014. Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. Ecological Indicators 46: 214–223. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.06.013

Mialyk O, Schyns JF, Booij MJ, Hogeboom RJ. 2022. Historical simulation of maize water footprints with a new global gridded crop model ACEA. Hydrology and Earth System Sciences 26 (4): 923–940. https://doi.org/10.5194/hess-26-923-2022

Romero-Padilla A, Hernández-Juárez M, Espinosa Herrera JM. 2024. Pérdida de superficie agrícola en los distritos de riego del Estado de México y patrones de crecimiento urbano. Investigaciones Geográficas 115: e60863. https://doi.org/10.14350/rig.60863

Vázquez del Mercado Arribas R, Lambarri Beléndez J (eds.). 2017. Huella hídrica en México: análisis y perspectivas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua: Jiutepec, Morelos, México. 255 p.

Zetina-Espinosa AM, Mora-Flores JS, Martínez-Damián MA, Cruz-Jiménez J, Téllez-Delgado R. 2013. Valor económico del agua en el distrito de riego 044, Jilotepec, Estado de México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo 10 (2): 139–156. https://doi.org/10.22231/asyd.v10i2.1132

CAPITULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

La evaluación de la huella hídrica de la producción de maíz grano en los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088 del Estado de México permitió identificar diferencias importantes en la cantidad de agua asociada con cada tonelada producida. Los resultados obtenidos muestran que la huella hídrica no debe interpretarse únicamente a partir del volumen de agua utilizado, debido a que el rendimiento agrícola interviene directamente en la magnitud del indicador. En el análisis realizado, los distritos con mayores rendimientos presentaron menores valores de huella hídrica por tonelada, mientras que el DR 033, con el rendimiento más bajo, registró el valor más elevado.

Esta relación evidencia la importancia de analizar conjuntamente el consumo de agua por unidad de superficie y la producción obtenida. Una menor huella hídrica por tonelada no necesariamente significa que se utilice un menor volumen absoluto de agua por hectárea, ya que el indicador también puede disminuir como consecuencia de un incremento en el rendimiento. En la presente investigación, las estimaciones se realizaron utilizando condiciones climáticas históricas de referencia de las estaciones Toluca y Chapingo, manteniendo los mismos parámetros del cultivo para los cuatro distritos de riego. Por ello, las diferencias en la huella hídrica unitaria estuvieron relacionadas tanto con los rendimientos agrícolas como con las condiciones meteorológicas consideradas en cada

estación. En consecuencia, los resultados permiten comparar los volúmenes estimados por tonelada producida, sin representar directamente las condiciones particulares de consumo de agua en cada distrito.

Los componentes de la huella hídrica también permiten distinguir el origen y las características del agua relacionada con la producción. En los cálculos desarrollados en el Capítulo III, el componente verde representó la mayor proporción de la huella total, seguido del componente gris, mientras que el azul presentó la menor participación. Esta distribución estuvo relacionada con las condiciones climáticas históricas utilizadas y los parámetros establecidos para la estimación. Los resultados muestran la importancia de analizar separadamente el aporte de la precipitación, el agua proveniente del riego y la presión potencial asociada con el uso de fertilizantes nitrogenados, ya que cada componente representa una dimensión diferente del aprovechamiento de los recursos hídricos.

La estimación de la huella gris muestra, además, que el análisis de la producción agrícola no debe limitarse únicamente a la cantidad de agua consumida. La fertilización puede generar una presión potencial sobre la calidad del recurso, por lo que la incorporación de este componente amplía la evaluación hacia aspectos ambientales que normalmente no son considerados cuando únicamente se analizan volúmenes de riego. En este sentido, mejorar el manejo de los fertilizantes puede contribuir simultáneamente al desempeño productivo del cultivo y a la reducción de los impactos potenciales sobre los sistemas hídricos.

Desde la perspectiva económica, los resultados obtenidos muestran que las diferencias entre los Distritos de Riego no dependen exclusivamente de los volúmenes de agua asociados con la producción. También intervienen el rendimiento agrícola y el precio medio rural, los cuales influyen en el valor comercial obtenido. La productividad aparente del agua, calculada mediante la relación entre el precio medio rural y los componentes azul y verde de la huella hídrica, presentó valores comprendidos entre 6.62 y 9.05 MXN/m³. El DR 033 registró el mayor valor, mientras que el DR 044 presentó el menor. Estos

resultados muestran la importancia de incorporar variables económicas al análisis de la huella hídrica, aunque el indicador utilizado no representa directamente la rentabilidad neta de la producción.

Adicionalmente, el valor bruto de la producción por hectárea permitió identificar diferencias económicas entre los distritos de riego analizados. El DR 088 presentó el mayor valor, con 31,540 MXN/ha, seguido de los distritos 073, 033 y 044. Estos resultados estuvieron relacionados con los rendimientos agrícolas y los precios medios rurales registrados durante el ciclo agrícola 2023–2024. La comparación de ambos indicadores mostró que el distrito con mayor productividad aparente del agua no necesariamente presenta el mayor valor bruto de producción por hectárea, por lo que resulta conveniente considerar conjuntamente las variables hídricas, productivas y económicas.

La comparación conjunta de la dimensión hídrica, productiva y económica permite observar que un mejor desempeño del sistema agrícola no depende únicamente de reducir el suministro de agua. El incremento del rendimiento mediante mejores prácticas agronómicas, manejo adecuado de nutrientes, selección de materiales adaptados y una administración más eficiente del riego puede aumentar la cantidad de producto obtenida por unidad de recurso. Por esta razón, las estrategias orientadas a mejorar la productividad del agua deben considerar el sistema productivo en su conjunto y no únicamente la infraestructura de riego.

Los resultados también muestran la utilidad del Distrito de Riego como unidad de análisis. La disponibilidad de información sobre superficie sembrada, rendimiento, producción y precio permite establecer comparaciones regionales y vincular variables productivas con indicadores de consumo de agua. No obstante, las diferencias internas existentes dentro de cada distrito deben considerarse al interpretar los resultados, debido a que los valores utilizados representan condiciones agregadas y no necesariamente describen las características individuales de todas las parcelas o productores.

En este sentido, los resultados obtenidos deben entenderse como una aproximación a la relación existente entre producción de maíz y uso del agua a escala de Distrito de Riego. La utilización de información climática, agronómica y productiva más desagregada permitiría en futuras investigaciones desarrollar estimaciones con mayor resolución espacial y evaluar diferencias entre módulos, unidades de riego o productores individuales.

En conjunto, la investigación permite concluir que la evaluación de la huella hídrica adquiere mayor utilidad cuando se analiza conjuntamente con el rendimiento y la productividad económica del agua. La integración de estas variables permite pasar de una evaluación basada exclusivamente en volúmenes hacia una interpretación más amplia del desempeño del recurso dentro del proceso productivo. Bajo este enfoque, la gestión del agua agrícola no implica únicamente utilizar una menor cantidad del recurso, sino obtener una mayor producción y valor económico por unidad de agua consumida, procurando al mismo tiempo disminuir los impactos potenciales sobre su calidad.

Finalmente, la comparación de los Distritos de Riego 033, 044, 073 y 088 constituye una base para identificar diferencias regionales en la producción de maíz y para orientar posteriores evaluaciones sobre alternativas de manejo. La información generada puede servir como referencia para analizar escenarios de mejora del rendimiento, manejo del riego, fertilización y productividad económica, así como para ampliar el estudio hacia otros ciclos agrícolas y condiciones climáticas.

Los resultados obtenidos mostraron que la clasificación de los distritos de riego según su huella hídrica consuntiva no coincidió con la obtenida mediante la productividad aparente del agua. El DR 033 presentó el mayor valor de huella hídrica consuntiva por tonelada, pero también registró la mayor productividad aparente, debido principalmente a su precio medio rural. Por otra parte, el DR 088 obtuvo la menor huella hídrica consuntiva y ocupó el segundo lugar en productividad aparente. Estas diferencias muestran que el desempeño económico de la producción de maíz no depende exclusivamente del volumen de

agua estimado o del rendimiento agrícola, sino también del precio comercial del producto y de las condiciones utilizadas en la evaluación. En consecuencia, los resultados destacan la importancia de analizar conjuntamente los indicadores hídricos, productivos y económicos para comparar los distritos de riego.

4.1 Limitaciones y recomendaciones para futuras investigaciones

La principal limitación de la investigación se relaciona con la disponibilidad y resolución espacial de la información utilizada. Los Distritos de Riego constituyen unidades territoriales amplias dentro de las cuales pueden existir diferencias en clima, suelo, fechas de siembra, prácticas de fertilización, sistemas de riego y rendimiento. Los resultados deben interpretarse como estimaciones comparativas a escala distrital, obtenidas mediante información agrícola agregada y condiciones hídricas de referencia comunes, y no como valores que representen las características particulares de cada parcela.

Asimismo, la estimación de los requerimientos hídricos depende directamente de la calidad y representatividad de la información climática y agronómica utilizada en CROPWAT. En esta investigación se utilizaron registros climáticos históricos de las estaciones Toluca y Chapingo, los cuales no necesariamente representan las condiciones observadas durante el ciclo agrícola 2023–2024. Además, los componentes azul y verde se estimaron mediante la separación de la evapotranspiración del cultivo y la precipitación efectiva en periodos aproximados de diez días, por lo que los resultados corresponden a condiciones climáticas de referencia y no representan una medición directa del agua efectivamente consumida por el cultivo. Futuras investigaciones podrían incorporar información meteorológica correspondiente al periodo de estudio, características detalladas de los suelos, fechas de siembra específicas y registros del agua aplicada en cada distrito, permitiendo mejorar la representación espacial del uso del recurso.

Para la huella hídrica gris sería conveniente disponer de información directa sobre dosis de fertilización, eficiencia de aprovechamiento del nitrógeno y concentraciones naturales de los cuerpos de agua correspondientes a cada zona. En esta investigación se utilizó un paquete de fertilización de referencia de FIRA

correspondiente a 2025 y una fracción uniforme de lixiviación y escurrimiento, por lo que los resultados representan una estimación de la contaminación potencial y no las condiciones observadas durante el ciclo agrícola 2023–2024. Contar con información específica de cada distrito reduciría la dependencia de coeficientes generales y permitiría representar con mayor precisión las condiciones ambientales de los sistemas estudiados.

Finalmente, la dimensión económica puede ampliarse mediante información sobre costos de producción, rentabilidad y restricciones de disponibilidad de agua. Los indicadores utilizados en esta investigación permiten relacionar el valor comercial de la producción con el consumo hídrico estimado mediante la productividad aparente del agua, así como determinar el valor bruto de la producción por hectárea. Sin embargo, estos indicadores no representan directamente la rentabilidad neta del cultivo ni el valor marginal del agua. La incorporación de información sobre costos agrícolas y modelos de programación matemática o funciones de producción permitiría profundizar en la evaluación económica y estimar posteriormente el precio sombra del agua para cada Distrito de Riego.

CAPÍTULO 5. LITERATURA CITADA

Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. Water Resources Management, 24, 941–958. doi: 10.1007/s11269-009-9480-8.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Botello-Aguillón, C., Valdivia Alcalá, R., Sangerman-Jarquín, D. M., Hernández Ortiz, J., Gutiérrez García, F. G., & Sandoval Romero, F. (2024). Estimación de la huella hídrica agrícola del DR 011, alto río Lerma. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 15*(6), e3319. https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3319.

Comisión Nacional del Agua. (2025). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*. Gobierno de México.

Diario Oficial de la Federación. (2026). *Programa Nacional Hídrico 2026–2030*. Secretaría de Gobernación.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2003). *Unlocking the water potential of agriculture*. FAO.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (s. f.). *CROPWAT 8.0*. Land and Water Division.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025a). CLIMWAT: Climatic database to be used with CROPWAT. https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/climwat-for-cropwat/en/

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025b). Crop water and irrigation requirements program of FAO (CROPWAT). https://www.fao.org/land-water/resources/tools/software/cropwat/en

Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. (2025). Sistema de costos agrícolas: Maíz, zona Valles Altos, México, ciclo primavera-verano 2025, modalidad de labranza de conservación.

Franke, N. A., Boyacioglu, H., & Hoekstra, A. Y. (2013). Grey water footprint accounting: Tier 1 supporting guidelines (Value of Water Research Report Series No. 65). UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Fuentes-López, F. D., Hernández-Ortíz, J., Valdivia-Alcalá, R., & Garay-Jácome, A. S. (2026). Gestión sostenible del agua en el Bajío: Huella hídrica, costos y políticas de riego. Economicus Journal of Business and Economics Insights, 3(1), 32–52. https://doi.org/10.54167/ejbei.v3i1.2010

Garay-Jácome ÁS, Valdivia-Alcalá R, Medellín-Azuara J, Hernández Ortiz J. 2025. Economic effects of drought in Irrigation District 023 San Juan del Río, Querétaro. Agro Productividad 18 (10): 25–33. https://doi.org/10.32854/4a36p027

Griffin, R. C. (2016). Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects (2nd ed.). MIT Press.

Hanemann, W. M. (2005). The economic conception of water. University of California, Berkeley.

Hirpa, B. A., Adane, G. B., Asrat, A., & Nedaw, D. (2023). Green, blue and economic water productivity: A water footprint perspective from the Upper Awash Basin, Central Ethiopia. Journal of Water and Climate Change, 14(2), 559–575. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.400

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan/Routledge. https://doi.org/10.4324/9781849775526

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan. doi: 10.4324/9781849775526.

Hoekstra, A. Y., Mekonnen, M. M., & Aldaya, M. M. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. ***Ecological Indicators***, *46*, 214–223.

International Organization for Standardization. (2014). ISO 14046:2014 Environmental management—Water footprint—Principles, requirements and guidelines. ISO.

Maraveles-Delgado, J. A., García-Salazar, J. A., Mora-Flores, J. S., & Botello-Aguillón, C. (2025). Efectos de la Política de Precios de Garantía y del Programa de Fertilizantes sobre la producción de maíz y el sistema agroalimentario mexicano.

Magaña-Zamora, J. D., Ortiz-Aguilar, T. Ll., & Hernández-Gen, J. (2017). La huella hídrica de productos agrícolas de la subcuenca Salamanca. En R. Vázquez del Mercado Arribas & J. Lambarri Beléndez (Eds.), *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas* (pp. 175–206). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products. *Hydrology and Earth System Sciences, 15*(5), 1577–1600. doi: 10.5194/hess-15-1577-2011.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint benchmarks for crop production: A first global assessment. *Ecological Indicators, 46*, 214–223. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.06.013.

Mekonnen, M. M., & Gerbens-Leenes, W. (2020). The water footprint of global food production. Water, 12(10), 2696. https://doi.org/10.3390/w12102696

Mialyk, O., Schyns, J. F., Booij, M. J., & Hogeboom, R. J. (2022). Historical simulation of maize water footprints with a new global gridded crop model ACEA. *Hydrology and Earth System Sciences, 26*, 923–940. https://doi.org/10.5194/hess-26-923-2022.

Molden, D., Oweis, T., Steduto, P., Bindraban, P., Hanjra, M. A., & Kijne, J. (2010). Improving agricultural water productivity: Between optimism and caution. *Agricultural Water Management, 97*(4), 528–535. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.03.023.

Montesillo-Cedillo, J. L. (2016). Rendimiento por hectárea del maíz grano en México: distritos de riego vs temporal. *Economía Informa, 398*, 60–74. https://doi.org/10.1016/j.ecin.2016.04.005.

Montesillo-Cedillo, J. L. (2023). Valor del agua en la producción agrícola bajo riego en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 14*(8), e2715. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i8.2715.

Peñaloza-Sánchez, A. M., Bustamante-González, Á., Vargas-López, S., Jaramillo-Villanueva, J. L., & Quevedo-Nolasco, A. (2020). Huella hídrica de los cultivos de cebolla (Allium cepa L.) y tomate de cáscara (Physalis ixocarpa Brot.) en la región de Atlixco, Puebla, México. Tecnología y Ciencias del Agua, 11(5), 1–30. doi: 10.24850/j-tyca-2020-05-01.

Perry, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail? Agricultural Water Management, 134, 119–125. doi: 10.1016/j.agwat.2013.12.004.

Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, 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, 47*(1), 93–107.

Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2017). Huella hídrica y productividad económica del agua en nogal pecanero (Carya illinoinensis) al suroeste de Coahuila, México. Estudios de Economía Aplicada, 35(3), 697–716.

Romero-Padilla, A., Hernández-Juárez, M., & Espinosa Herrera, J. M. (2024). Pérdida de superficie agrícola en los distritos de riego del Estado de México y patrones de crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas*, (115). https://doi.org/10.14350/rig.60863.

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Panorama Agroalimentario 2018–2024*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

Van der Laan, M., Jarmain, C., Bastidas-Obando, E., Annandale, J. G., Fessehazion, M., & Haarhoff, D. (2019). Are water footprints accurate enough to be useful? A case study for maize (*Zea mays* L.). *Agricultural Water Management, 213*, 512–520. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.10.026.

Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (Eds.). (2017). *Huella hídrica en México: análisis y perspectivas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Young, R. A., & Loomis, J. B. (2014). *Determining the economic value of water: Concepts and methods* (2nd ed.). RFF Press/Routledge.

Zetina-Espinosa, A. M., Mora-Flores, J. S., Martínez-Damián, M. Á., Cruz-Jiménez, J., & Téllez-Delgado, R. (2013). Valor económico del agua en el Distrito de Riego 044, Jilotepec, Estado de México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 10*(2), 139–156.