



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS

ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS

Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales.

“ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO EN EL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO”

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS
RECURSOS NATURALES**

Presenta:

Joanna Jocabed Gómez Gracilazo

Bajo la supervisión de:

Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Chapingo, Estado de México abril de 2026.



APROBADA



**ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ
GRANO EN EL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO,
QUERÉTARO**

Tesis realizada por Joanna Jocabed Gómez Garcilazo bajo la dirección del Jurado
indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el
grado de:

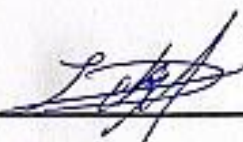
**MAESTRA EN CIENCIAS EN ECONOMÍA AGRÍCOLA Y DE LOS RECURSOS
NATURALES**

Director:



Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Codirector:



Dra. Ángeles Suhgey Garay Jácome

Asesor:



Dr. Juan Hernández Ortiz

Asesor:



Dr. Alberto Gallegos David

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Planteamiento del problema.....	4
1.2 Objetivos de la investigación	6
1.2.1 Objetivo general.....	6
1.2.2 Objetivos específicos.....	6
1.3 Hipótesis de la investigación.....	6
1.3.1 Hipótesis general.....	6
1.3.2 Hipótesis específicas.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Estructura del documento.....	8
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Situación global de los del uso del agua en el sector agrícola.....	10
2.2 Estado actual de Los Recursos Hídricos en México.....	12
2.2.1 Panorama hídrico nacional.....	13
2.2.3 Escasez de Agua y Estrés Hídrico.....	22
2.3 Escasez hídrica y productividad del agua en la gestión agrícola.....	24
2.4 La productividad del agua y la agricultura	26
2.5 El agua y la agricultura en México	29
2.6 Huella Hídrica.....	31
2.7 Literatura citada	47
3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO EN EL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO	53
3.1 Resumen.....	53
3.2 Introducción	55
3.3 Materiales y métodos	57
3.4 Resultados y Discusión.....	60
3.5 Conclusiones	67
3.6 Literatura citada.....	68

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Evolución de la Huella Hídrica	36
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estructura del documento de Tesis	9
Figura 2: Regiones Hidrológicas. CONAGUA 2024a.	14
Figura 3: Regiones Hidrológicas-Administrativas (Rha) Y Acuíferos. CONAGUA, 2024a	15
Figura 4: Ríos Principales De México. CONAGUA, 2024a	16
Figura 5: Acuíferos Sobreexplotados En 2021 Y 2022. CONAGUA 2024a	18
Figura 6: Localización Del Acuífero. CONAGUA 2024	20
Figura 7: Variación De La Huella Hídrica Azul Del Maíz Grano (2000–2023).	61
Figura 8: Variación De La Huella Hídrica Verde Del Maíz Grano (2000–2023).	62
Figura 9: Variación De La Huella Hídrica Gris Del Maíz Grano (2000–2023).	63
Figura 10: Figura 4. Huella Hídrica Total Del Maíz Grano (2000–2023).	64

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACV. Análisis del Ciclo de Vida

BANXICO Banco de México

CEDRSSA Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria

CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CONAHCyT Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua

DOF. Diario Oficial de la Federación

DR023. Distrito de Riego San Juan del Río Querétaro

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

GIRH. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

HH. Huella Hídrica

HH azul Huella Hídrica azul

HH verde Huella Hídrica verde

HH gris Huella Hídrica gris

IICA Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

IMCO Instituto Mexicano para la Competitividad

IMTA Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IPCC. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

ISO. Organización Internacional de Normalización

IWMI. Instituto Internacional de Manejo del Agua

NOM. Norma Oficial Mexicana

ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU. Organización de las Naciones Unidas

RH. Regiones Hidrológicas

SEMARNAT Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

UNESCO Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura ONU-Agua

WEF. Foro Económico Mundial

WFN. Water Footprint Network

WWAP. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos

WWAP. World Water Assessment Programme – UNESCO/ Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos - UNESCO

WWF. Fondo Mundial para la Naturaleza

DEDICATORIAS

“Den gracias a Jehová, porque él es bueno; su amor leal dura para siempre.”

(Salmos 107:1)

Primeramente, a Jehová Dios, por permitirme concluir este proceso académico, por brindarme salud, fortaleza y guiarme día a día, aun en medio de las dificultades.

A mi madre, la Sra. Angela Garcilaso Contreras, por su amor incondicional, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo, valores y perseverancia, y por siempre tener una palabra de aliento para seguir adelante.

A mi compañero de vida, gracias por tu apoyo, paciencia, serenidad y empatía. Gracias por estar a mi lado en cada momento, incluso en aquellos que no fueron fáciles de recorrer. A ti, mi amorcito Israel, gracias por acompañarme en este proceso de crecimiento y desarrollo profesional.

A mi bebé arcoíris, gracias por haber estado unos días conmigo. Siempre vivirás en mí; dejaste una huella imborrable y serás por siempre mi luz.

A mis hermanos y sobrinos, con todo mi cariño. Deseo de corazón que este trabajo sea un ejemplo para ustedes y los motive a alcanzar sus metas, siempre con la guía de Dios.

AGRADECIMIENTOS

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)

Por la beca otorgada para la realización de estudios de posgrado, dado que sin este apoyo hubiera sido más difícil obtener el grado, así con el respaldo económico me permitió centrarme de lleno en la investigación, gracias.

A mi alma mater la Universidad Autónoma Chapingo

Que ha visto desarrollarme desde preparatoria, universidad y hasta este grado académico, gracias, por tanto, por arroparme como mi segunda casa.

División de Ciencias Económico-Administrativas (DICEA)

Por darme la oportunidad de recibir una educación integral y de calidad, con todos y cada uno de sus profesores que me ayudaron a desarrollarme en esta etapa de enseñanza las cuales han contribuido a mi desarrollo personal y profesional.

Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Profesor investigador del Posgrado de la DICEA, Investigador Nivel 2 del SNII

Por toda su guía, el basto conocimiento y su experiencia que estuvo compartiéndome para que este trabajo fuese llevado a cabo. Gracias por sus explicaciones meticulosas y sus recomendaciones constructivas. Su apoyo constante, así como su orientación fueron fundamentales para realizar esta investigación.

Dra. Ángeles Suhgey Garay Jácome

Por su guía y conocimiento, por sus palabras que siempre fueron de aliento y me ayudaron a retomar el curso.

Dr. Juan Hernández Ortiz

Coordinador y profesor investigador del Posgrado de la DICEA

Por ser parte importante en mi formación académica y en el desarrollo de este trabajo, por su tiempo dedicado, gracias.

Dr. Alberto Gallegos David

Muchas gracias por ser parte de mi formación académica y guía en esta investigación, por su tiempo y sus aportaciones.

DATOS BIOGRÁFICOS



Nombre: JOANNA JOCABED GÓMEZ GARCILAZO

Fecha de nacimiento: 24 de septiembre de 1989

Lugar de nacimiento: Montecillo, Estado de México

CURP: GOGJ890924MMCMRN09

Profesión: Ingeniero Agroindustrial

Desarrollo académico

Licenciatura: Ingeniería agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo.

Cédula profesional: 11532427

RESUMEN GENERAL

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO EN EL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO

El agua es un recurso esencial para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria, por lo que su uso eficiente en la agricultura resulta clave para la sostenibilidad. En este contexto, la huella hídrica se ha consolidado como un indicador integral para evaluar el consumo de agua y los impactos asociados a la producción agrícola. El objetivo de este estudio fue estimar la huella hídrica verde, azul y gris del cultivo de maíz grano durante el ciclo primavera-verano en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro, México. Se aplicó la metodología de la Water Footprint Network, utilizando información del periodo 2000–2023. Los requerimientos hídricos se calcularon mediante los programas CROPWAT 8.0 y CLIMWAT 2.0, considerando variables climáticas, agronómicas y de manejo. Asimismo, se emplearon datos oficiales de producción y superficie sembrada. Los resultados muestran que la huella hídrica total del maíz osciló entre 1,154 y 1,972 L/kg, con un promedio cercano a 1,400 L/kg. La componente predominante fue la huella hídrica azul, lo que indica alta dependencia del riego y presión sobre los recursos hídricos. La huella verde presentó valores menores y relativamente estables, asociados a la precipitación, mientras que la huella gris reflejó el impacto del uso de fertilizantes. En general, se observó una tendencia a la disminución de la huella hídrica en años recientes, vinculada a mejoras en el rendimiento y eficiencia del agua. No obstante, la alta participación de la huella azul evidencia la necesidad de estrategias que reduzcan la dependencia del riego y promuevan un uso más sostenible del agua.

Palabras clave: Huella hídrica; Maíz grano; Gestión sustentable del agua; Agricultura de temporal; Distrito de Riego 023; México, Querétaro.

Tesis de Maestría en Ciencias en Economía Agrícola y de los Recursos Naturales, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Joanna Jocabed Gómez Garcilazo.

Director de tesis: Ramón Valdivia Alcalá

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE WATER FOOTPRINT IN THE PRODUCTION OF GRAIN MAIZE IN IRRIGATION DISTRICT 023 OF SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO

Water is an essential resource for economic development and food security; therefore, its efficient use in agriculture is key to sustainability. In this context, the water footprint has become a comprehensive indicator for assessing water consumption and the impacts associated with agricultural production. The objective of this study was to estimate the green, blue, and grey water footprint of grain maize during the spring–summer growing cycle in Irrigation District 023, San Juan del Río, Querétaro, Mexico. The methodology proposed by the Water Footprint Network was applied, using data from the 2000–2023 period. Crop water requirements were estimated using the CROPWAT 8.0 and CLIMWAT 2.0 models, considering climatic, agronomic, and crop management variables. In addition, official data on production and cultivated area were used. The results show that the total water footprint of maize ranged from 1,154 to 1,972 L/kg, with an average of approximately 1,400 L/kg. The dominant component was the blue water footprint, indicating a high dependence on irrigation and significant pressure on water resources. The green water footprint showed lower and relatively stable values, associated with precipitation variability, while the grey water footprint reflected the environmental impact of fertilizer use. Overall, a decreasing trend in the total water footprint was observed in recent years, mainly linked to improvements in crop yield and water use efficiency. However, the high contribution of the blue water footprint highlights the need to implement management strategies aimed at reducing irrigation dependence and promoting more sustainable water use.

Keywords: Water footprint; Grain maize; Sustainable water management; Rainfed agriculture; Irrigation District 023; Mexico, Querétaro.

Master's Thesis in Agricultural and Natural Resource Economics, Universidad Autónoma Chapingo.

Author: Joanna Jocabed Gómez Garcilazo

Thesis Advisor: Dr. Ramón Valdivia Alcalá

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El recurso hídrico constituye un elemento fundamental para el funcionamiento de los sistemas naturales y para el desarrollo de las actividades humanas, al estar estrechamente vinculado con la producción de alimentos, el bienestar social y la estabilidad ambiental. En este sentido, su aprovechamiento adecuado resulta indispensable para garantizar condiciones de sostenibilidad y equilibrio ecológico. No obstante, en las últimas décadas, la disponibilidad de agua dulce ha sido sometida a una presión creciente a nivel mundial, como resultado de factores como el cambio climático, el aumento de la población y las limitaciones en los esquemas de gestión del recurso (WEF, 2023; ONU, 2023).

Desde una perspectiva más amplia, el agua desempeña un papel estratégico en el desarrollo de las sociedades, ya que influye directamente en la salud pública, la calidad de vida, la producción agrícola y el crecimiento económico (FAO, 2023). En este contexto, avanzar hacia un manejo sostenible del recurso hídrico se ha convertido en uno de los principales desafíos del siglo XXI. A escala global, el consumo de agua ha crecido de manera acelerada, superando en diversos periodos el ritmo de crecimiento poblacional, lo que ha generado escenarios de alta presión sobre las fuentes disponibles, particularmente en regiones con condiciones climáticas adversas. Factores como la urbanización, la expansión de las actividades económicas y la contaminación han intensificado esta problemática sobre un recurso que, si bien es renovable, presenta limitaciones en su disponibilidad (FAO, 2013). A ello se suman los efectos del cambio climático, que han modificado el comportamiento del ciclo hidrológico, incrementando la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como sequías e inundaciones (IPCC, 2021).

El incremento en la demanda de agua asociado al crecimiento de las actividades productivas y del consumo ha generado presiones significativas tanto en la cantidad como en la calidad del recurso, contribuyendo al aumento del estrés hídrico y afectando sectores clave como la seguridad alimentaria, energética y ambiental

(SEMARNAT, 2018). Ante este escenario, resulta necesario replantear los enfoques tradicionales de gestión del agua, incorporando criterios que prioricen la eficiencia, la equidad y la sostenibilidad, con el fin de asegurar su disponibilidad para las generaciones actuales y futuras. En este contexto, la huella hídrica se ha consolidado como una herramienta analítica que permite evaluar de manera integral el uso del agua y sus impactos asociados, facilitando la formulación de estrategias orientadas a un manejo más responsable del recurso (Vázquez & Lambarri, 2017).

El enfoque de la huella hídrica, propuesto por Hoekstra (2003), se basa en la cuantificación del volumen total de agua utilizado en la producción de bienes y servicios, considerando tanto el uso directo como indirecto del recurso. Este indicador distingue entre agua verde, correspondiente a la precipitación; agua azul, proveniente de fuentes superficiales y subterráneas; y agua gris, relacionada con el volumen necesario para diluir contaminantes. De esta manera, integra dimensiones tanto cuantitativas como cualitativas que permiten analizar la sostenibilidad del uso del agua en distintos contextos (Hoekstra et al., 2011; Vázquez & Lambarri, 2017). En México, la huella hídrica presenta valores elevados en comparación con otros países, donde el sector agrícola concentra aproximadamente el 92 % del consumo, mientras que los sectores industrial y doméstico tienen una participación considerablemente menor (SIAP, 2016).

Dentro de este panorama, la agricultura se posiciona como el principal usuario del recurso hídrico, desempeñando un papel clave en la producción de alimentos y en la economía. Tanto a nivel global como nacional, este sector ejerce una presión significativa sobre las fuentes de agua, especialmente en regiones donde la disponibilidad es limitada (CONAGUA, 2023).

Factores como la variabilidad climática, el crecimiento poblacional y la intensificación de la producción han incrementado la demanda de agua, evidenciando la necesidad de mejorar su eficiencia en el uso. Asimismo, las alteraciones en los patrones de precipitación y evapotranspiración han generado una mayor incertidumbre en los ciclos agrícolas, afectando la productividad de los cultivos y la gestión del recurso (IPCC, 2021).

En el caso de México, la problemática hídrica se ve acentuada por la heterogeneidad en la distribución del recurso, la variabilidad climática y la creciente demanda de los distintos sectores productivos y de la población, lo que ha derivado en condiciones de estrés hídrico en diversas regiones del país (SEMARNAT, 2021).

En este contexto, la agricultura continúa siendo el principal consumidor de agua, incrementando la presión sobre acuíferos y cuerpos superficiales, particularmente en zonas de riego, donde la eficiencia en el uso del recurso suele ser limitada y la sobreexplotación de fuentes subterráneas representa un desafío importante para la sostenibilidad.

A nivel regional, el acuífero Valle de San Juan del Río, ubicado en el estado de Querétaro, presenta una problemática estructural asociada a la sobreexplotación del agua subterránea. La relación entre la recarga natural y las extracciones muestra un balance negativo persistente, con valores de extracción que superan la disponibilidad media anual, lo que evidencia una presión constante sobre el recurso (CONAGUA, 2023). Esta situación resalta la importancia de analizar los patrones de uso del agua en el sector agrícola, principal demandante en la región.

La aplicación del enfoque de huella hídrica permite evaluar de manera integral el uso del agua en los sistemas agrícolas, no solo en términos de volumen, sino también en relación con su eficiencia y los impactos ambientales asociados. Su utilización en distritos de riego facilita la identificación de áreas de oportunidad para mejorar la gestión del recurso y diseñar estrategias orientadas a la sostenibilidad.

Por ello, el presente estudio tiene como objetivo estimar la huella hídrica del cultivo de maíz grano en el Distrito de Riego 023 de San Juan del Río, Querétaro, con la finalidad de generar información que contribuya a la toma de decisiones y promueva un uso más eficiente y sostenible del agua en la agricultura.

1.1 Planteamiento del problema.

En las últimas décadas, la disponibilidad de los recursos hídricos ha experimentado una disminución progresiva como resultado de la interacción entre el crecimiento poblacional, la expansión de las actividades productivas y los efectos del cambio climático. Esta combinación de factores ha intensificado la presión sobre las fuentes de agua dulce, generando escenarios de escasez, deterioro ambiental y conflictos por el uso del recurso. En consecuencia, el agua ha pasado de ser un elemento que impulsa el bienestar social, ambiental y económico a constituirse en un factor que condiciona el desarrollo sostenible de los territorios, con implicaciones directas en la seguridad alimentaria, energética y en la salud de los ecosistemas (Vázquez & Lambarri, 2017; IPCC, 2021).

A escala global, la agricultura se identifica como el principal usuario del agua dulce disponible. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, este sector concentra más del 70 % de las extracciones totales y representa más del 90 % del consumo consuntivo del recurso. Asimismo, el crecimiento demográfico y los cambios en los patrones de consumo alimentario han incrementado de manera significativa la demanda de productos agrícolas, estimándose que hacia el año 2050 será necesario aumentar de forma sustancial la producción de cereales para satisfacer las necesidades de la población mundial, lo que incrementará aún más la presión sobre los recursos hídricos disponibles (FAO, 2013; FAO, 2023).

En el contexto nacional, México refleja una problemática similar en relación con el uso intensivo del agua en las actividades agropecuarias. Datos oficiales indican que el sector agrícola concentra más de tres cuartas partes del uso consuntivo del agua en el país, superando ampliamente a otros sectores como el abastecimiento público, la industria y la generación de energía eléctrica. Esta elevada participación del sector agrícola en la demanda hídrica pone de manifiesto la necesidad de evaluar la eficiencia en el uso del agua, especialmente en regiones donde la disponibilidad

del recurso es limitada y la producción agrícola depende en gran medida del riego (CONAGUA, 2023; CONAGUA, 2024a).

En el estado de Querétaro, particularmente en el Valle de San Juan del Río, la actividad agrícola se sustenta principalmente en la explotación de aguas subterráneas. Diversos estudios y diagnósticos oficiales han documentado que los volúmenes de extracción superan la recarga natural de los acuíferos, lo que ha derivado en procesos de sobreexplotación y en un desequilibrio del balance hídrico regional. Esta situación incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a periodos de sequía y compromete la disponibilidad futura del recurso, representando un riesgo para la continuidad de las actividades productivas y el desarrollo regional (SEMARNAT, 2021; CONAGUA, 2023).

Dentro de este contexto, el Distrito de Riego 023 concentra una proporción relevante de la producción agrícola del Valle de San Juan del Río, al mismo tiempo que enfrenta restricciones significativas en la disponibilidad de agua. No obstante, la información existente sobre el uso del recurso hídrico en la producción de los principales cultivos del distrito resulta limitada, lo que dificulta una evaluación integral de su impacto sobre el sistema hídrico. La ausencia de análisis específicos impide identificar posibles ineficiencias en el aprovechamiento del agua y limita el diseño de estrategias orientadas a una gestión más sostenible del recurso (Hoekstra et al., 2011; CONAGUA, 2023).

Ante esta problemática, resulta indispensable la aplicación de herramientas metodológicas que permitan cuantificar el volumen total de agua utilizado en la producción agrícola, considerando tanto el consumo directo como el indirecto a lo largo de los procesos productivos. En este sentido, la huella hídrica se ha consolidado como un indicador clave para dimensionar la presión ejercida por los cultivos sobre los recursos hídricos. La estimación de la huella hídrica de los principales cultivos del Distrito de Riego 023 permitirá identificar los componentes del consumo de agua y los factores que influyen en su magnitud, generando información técnica relevante para la toma de decisiones, la formulación de políticas públicas y la implementación de estrategias orientadas a una gestión integral y

sostenible del recurso hídrico en regiones con alta vulnerabilidad hídrica (Hoekstra, 2003; Hoekstra et al., 2011; Mekonnen & Hoekstra, 2012).

1.2 Objetivos de la investigación

A continuación, se presenta el objetivo general de la investigación y los objetivos específicos que lo integran.

1.2.1 Objetivo general.

- Estimar la huella hídrica azul, verde y gris del cultivo de maíz grano en el Distrito de Riego 023 de San Juan del Río, Querétaro.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Cuantificar la huella hídrica (azul, verde y gris) del cultivo de maíz grano del Distrito de Riego 023.
- Proponer acciones orientadas a la reducción de la huella hídrica en la producción agrícola del DR 023, a partir de los resultados obtenidos.

1.3 Hipótesis de la investigación.

En concordancia con los objetivos planteados, se formulan las siguientes hipótesis de investigación.

1.3.1 Hipótesis general.

- La estimación de la huella hídrica asociada a la producción del cultivo de maíz grano del Distrito de Riego 023 permitirá dimensionar su incidencia sobre el uso del recurso hídrico y generar información relevante para fortalecer la sostenibilidad ambiental, social y económica de la actividad agrícola en la región.

1.3.2 Hipótesis específicas.

- La huella hídrica del cultivo de maíz grano del Distrito de Riego 023 presenta mayor huella verde o azul, asociadas a sus requerimientos hídricos, prácticas de manejo y condiciones climáticas locales.
- El análisis de los componentes de la huella hídrica permitirá identificar oportunidades de mejora en el uso del agua, a partir de las cuales es posible

plantear acciones para reducir el consumo hídrico en la producción agrícola del DR 023.

1.4 Justificación.

El agua representa un recurso estratégico para el desarrollo productivo, la estabilidad ambiental y el bienestar social, particularmente en regiones donde la disponibilidad hídrica es limitada y la demanda asociada a las actividades agrícolas es elevada. Ante el incremento de las presiones sobre el recurso, derivadas del crecimiento poblacional, la intensificación de la producción agroalimentaria y los efectos del cambio climático se vuelve indispensable generar información que permita evaluar de manera objetiva el uso del agua y orientar su gestión hacia esquemas más eficientes y sostenibles (FAO, 2023).

En el estado de Querétaro, y específicamente en el Valle de San Juan del Río, la agricultura constituye una actividad fundamental para la economía regional y depende en gran medida del riego. El Distrito de Riego 023 concentra una proporción significativa de la superficie agrícola y del consumo de agua, lo que incrementa la presión sobre las fuentes hídricas disponibles, particularmente los acuíferos. Esta situación se ve agravada por la variabilidad climática y la disminución en la recarga natural, factores que comprometen la sostenibilidad de la producción agrícola a mediano y largo plazo.

Bajo este contexto, resulta necesario contar con herramientas analíticas que permitan dimensionar el impacto real de los cultivos sobre el recurso hídrico. La estimación de la huella hídrica azul y verde de los principales cultivos del Distrito de Riego 023 responde directamente al objetivo general de esta investigación, al proporcionar una cuantificación integral del volumen de agua utilizado durante el proceso productivo, considerando tanto el uso directo como el indirecto. Este enfoque permite identificar diferencias en los requerimientos hídricos entre cultivos y evaluar su incidencia sobre la disponibilidad regional de agua, en concordancia con las hipótesis planteadas.

Asimismo, el análisis detallado de los componentes de la huella hídrica aporta elementos técnicos para el cumplimiento de los objetivos específicos de la investigación, al facilitar la identificación de oportunidades de mejora en el uso del agua y sustentar la propuesta de acciones orientadas a la reducción del consumo hídrico en la producción agrícola del DR 023. De esta manera, los resultados obtenidos contribuyen no solo al fortalecimiento del conocimiento científico en materia de gestión del agua, sino también al diseño de estrategias y políticas públicas que promuevan una agricultura más eficiente, resiliente y ambientalmente sostenible en regiones con estrés hídrico.

1.5 Estructura del documento

La presente tesis se estructura en tres capítulos que, de manera articulada, permiten desarrollar el análisis de la huella hídrica de los principales cultivos en el Distrito de Riego 023 de San Juan del Río, Querétaro. Cada capítulo aborda aspectos específicos que, en conjunto, contribuyen a la comprensión integral del uso del agua en el cultivo del maíz en del área de estudio.

El capítulo uno se expone una visión general del problema hídrico, destacando su importancia en los contextos global y nacional. De igual forma, se precisan los objetivos que orientan el estudio, se plantean las hipótesis que guían el análisis y se presenta la justificación, enfatizando la relevancia social, económica y ambiental de la investigación.

El capítulo dos se presenta la revisión de la literatura que sustenta la investigación. En una primera sección se analizan aspectos generales del recurso hídrico en México, incluyendo su disponibilidad y distribución, los enfoques de gestión integrada, la problemática de la escasez y el estrés hídrico, se examina el enfoque de la huella hídrica, describiendo sus componentes metodológicos —verde, azul y gris— y su aplicación en los sectores agrícola. De igual forma, se revisan investigaciones desarrolladas tanto en el ámbito nacional como internacional, lo cual facilita el reconocimiento de los principales antecedentes, patrones de análisis y áreas aún poco exploradas, aportando así un sustento sólido a la pertinencia y justificación de esta investigación.

En el capítulo tres se encuentra la propuesta del manuscrito, mismo que incluye la metodología empleada que se basa en Mekonnen y Hoekstra (2012). En ésta se estima la huella hídrica verde y azul del cultivo maíz grano del Distrito de Riego 023 de San Juan del Río, Querétaro.

En conjunto, el desarrollo del documento establece un hilo conductor que vincula los fundamentos teóricos con el análisis aplicado, aportando resultados que fortalecen la comprensión del recurso tan valioso ypreciado como es el agua, orientado a la actividad agrícola y contribuyen al diseño de estrategias de gestión hídrica orientadas a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en el aprovechamiento del recurso.

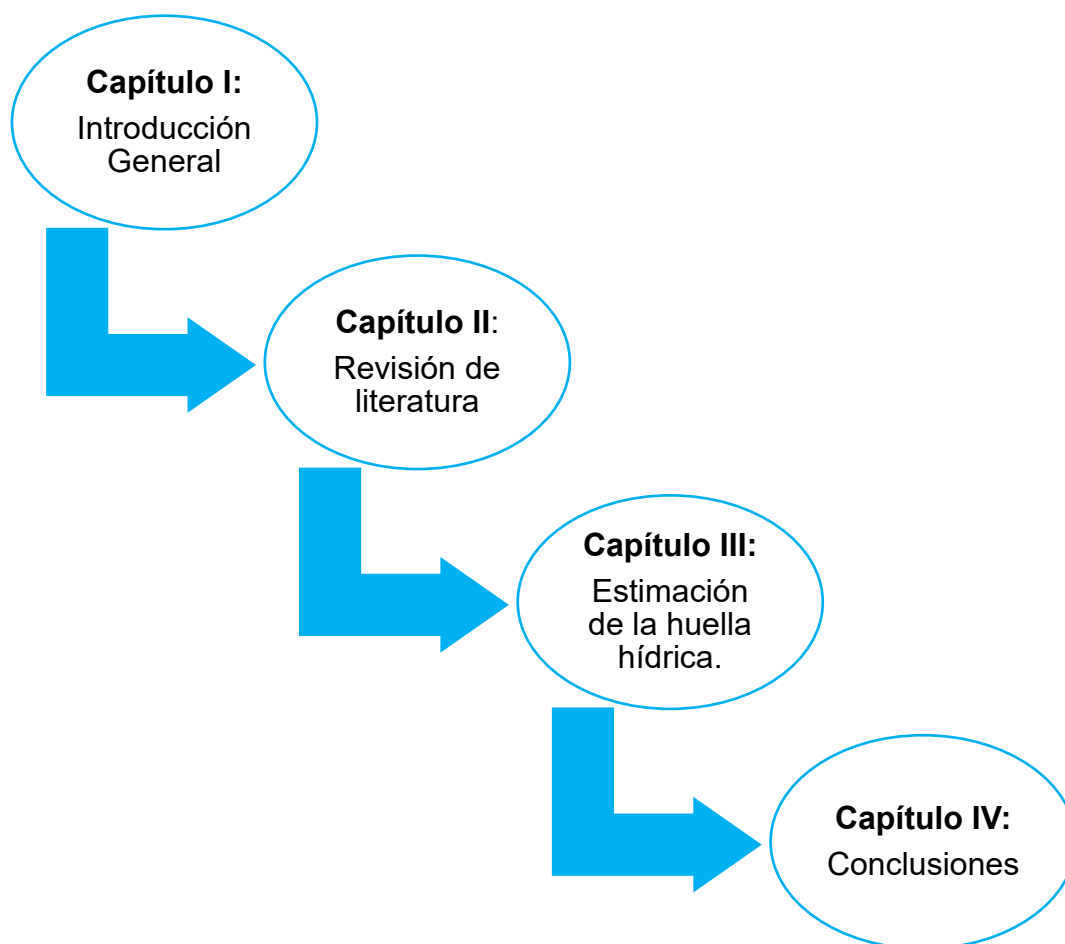


FIGURA 1: ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO DE TESIS

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se presenta la revisión de literatura organizada en dos apartados. El primero examina estudios relacionados con la problemática general del recurso hídrico y los principales desafíos que enfrenta el sector, mientras que el segundo se centra en el análisis del enfoque de la huella hídrica, considerando sus distintas dimensiones y aplicaciones.

2.1 Situación global de los del uso del agua en el sector agrícola

La actividad agrícola se ha posicionado como el mayor demandante de agua dulce a escala global desde mediados del siglo XX, destinándose cerca del 70% de las extracciones hídricas totales a la producción de alimentos (FAO, 2020). Esta tendencia se reforzó a partir de la Revolución Verde durante la década de 1960, periodo caracterizado por la ampliación de la superficie agrícola bajo riego como estrategia para asegurar el abastecimiento alimentario mundial. No obstante, dicho proceso de intensificación productiva ha derivado en importantes impactos ambientales, entre los que destacan la contaminación asociada al uso de agroquímicos y la salinización de los suelos, factores que ponen en riesgo la sostenibilidad de los sistemas agroalimentarios contemporáneos (ONU, 2022).

El cambio climático, junto con el incremento sostenido en la demanda de agua, representa un reto significativo para el sector agrícola. De acuerdo con estimaciones del IPCC (2022) y la ONU (2023), las pérdidas económicas anuales en cultivos básicos como el maíz y el trigo superan los 94 mil millones de dólares, lo que evidencia la alta sensibilidad de los sistemas productivos frente a la variabilidad climática. Asimismo, durante el periodo 2010–2018, las extracciones de agua destinadas a la agricultura a nivel mundial registraron un incremento cercano al 5%, llegando a representar alrededor del 72% del uso total de aguas superficiales y subterráneas (FAO, 2021; UNESCO, 2019).

Aunque el riego con agua subterránea presenta niveles de eficiencia aproximadamente 43% superiores en comparación con el riego superficial (FAO, 2021), su explotación intensiva ha provocado una disminución cercana al 20% en la

disponibilidad de recursos hídricos renovables per cápita desde el año 2000 (ONU, 2023). Esta dinámica genera un ciclo problemático, ya que, si bien el riego contribuye a cerca del 40% de la producción mundial de alimentos, la creciente dependencia de acuíferos con limitada recarga pone en riesgo la seguridad hídrica a largo plazo.

Las proyecciones hacia 2050 resultan aún más preocupantes. Se estima que alrededor del 52% de la población mundial y aproximadamente el 40% de la producción de cereales podrían enfrentar condiciones de escasez de agua, lo que dificultaría el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible vinculados con la erradicación del hambre y el acceso universal al agua potable (UNESCO, 2019). Paralelamente, la demanda urbana de agua podría incrementarse hasta en un 80%, intensificando la competencia por el recurso con el sector agrícola, mientras que regiones como el Mediterráneo y el sur de Asia podrían experimentar reducciones en los rendimientos agrícolas de entre 15% y 35% debido al estrés hídrico (IPCC, 2021). Esta situación refleja una paradoja creciente: la agricultura necesitará mayores volúmenes de agua para abastecer a una población superior a los 9 mil millones de personas, pero el uso ineficiente del recurso limita su disponibilidad para otros sectores estratégicos (Banco Mundial, 2024).

En este contexto, se reconoce que la seguridad alimentaria y la sostenibilidad del agua están profundamente interrelacionadas. Enfrentar el desafío de alimentar a una población en expansión exige optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico mediante el uso eficiente de cada unidad disponible. La adopción de tecnologías de riego avanzadas, la gestión integral de cuencas y el fortalecimiento de marcos regulatorios se consideran elementos clave para incrementar la productividad del agua sin comprometer la integridad de los ecosistemas acuáticos. Asimismo, se advierte que el aumento en la demanda hídrica no responde únicamente al crecimiento poblacional, sino a la competencia entre sectores.

En síntesis, la interacción entre los recursos hídricos y la actividad agrícola a escala global evidencia una problemática creciente que requiere respuestas inmediatas y coordinadas. La incorporación de innovaciones tecnológicas, junto con enfoques de

gestión integrada del agua y marcos regulatorios sólidos, constituye un elemento fundamental para asegurar tanto la producción alimentaria como la sostenibilidad del recurso hídrico frente a las presiones derivadas del cambio climático y el crecimiento poblacional en el siglo XXI.

2.2 Estado actual de Los Recursos Hídricos en México

Las estadísticas recientes sobre el agua en México evidencian que el país enfrenta una presión creciente sobre el ciclo hidrológico como resultado de la interacción entre factores naturales y actividades humanas. Esta presión se manifiesta tanto de manera directa como indirecta, generando impactos que trascienden el ámbito ambiental y afectan la calidad de vida de la población, el equilibrio de los ecosistemas y la conservación de la biodiversidad. En un contexto marcado por el crecimiento demográfico, el aumento del nivel de consumo y la expansión de las actividades productivas, la demanda de alimentos, energía y agua se ha incrementado de forma sostenida, lo que ha intensificado la extracción del recurso hídrico. Como consecuencia, se observa una reducción en la disponibilidad natural per cápita, así como problemas asociados a la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación y la disminución de la calidad del agua en las reservas naturales, lo que plantea desafíos estructurales para la gestión y la seguridad hídrica del país (CONAGUA, 2024a).

En el contexto nacional, el agua es considerada un recurso estratégico y un elemento vinculado a la seguridad del país. En la actualidad, ocupa un lugar prioritario dentro de la política ambiental, además de desempeñar un papel determinante en las estrategias de desarrollo social y económico. La disponibilidad hídrica influye directamente en las posibilidades de crecimiento regional, mientras que su calidad repercute de manera significativa en la salud y el bienestar de la población. En este sentido, la gestión del agua se sustenta en el marco jurídico nacional y en la responsabilidad institucional del Estado a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2006).

En México los recursos hídricos presentan presiones importantes. Las aguas superficiales enfrentan problemas de contaminación por descargas urbanas, industriales y agrícolas, así como limitaciones en el tratamiento de aguas residuales, lo que afecta su calidad.

Por su parte, las aguas subterráneas muestran señales de sobreexplotación en diversos acuíferos, especialmente en zonas de alta demanda, comprometiendo su disponibilidad futura. En este marco, ambas fuentes son consideradas bienes nacionales y su gestión corresponde al Poder Ejecutivo mediante la Ley de Aguas Nacionales, que establece los lineamientos para su uso y conservación, y a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), encargada de regular y administrar el aprovechamiento del recurso (SEMARNAT, 2018).

2.2.1 Panorama hídrico nacional

A escala nacional, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene el registro de la existencia de 37 regiones hidrológicas (RH), éstas están ubicadas de acuerdo con los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, así como de las condiciones climáticas, geológicas y fisiográficas del territorio. Cada región hidrológica comprende una o varias cuencas, las cuales constituyen la unidad básica para el análisis del recurso hídrico (CONAGUA, 2024a). Esta delimitación territorial resulta esencial para la gestión del agua, ya que permite evaluar de manera diferenciada su disponibilidad, calidad y patrones de demanda en el país, además de apoyar la detección de áreas con presión hídrica y el diseño de medidas orientadas al uso

sostenible y la conservación del recurso (DOF, 2020).



FIGURA 2: REGIONES HIDROLÓGICAS. CONAGUA 2024A.

Una cuenca hidrográfica se define como “un espacio territorial delimitado por divisorias topográficas o parteaguas, dentro del cual los escurrimientos superficiales —como arroyos y ríos— convergen hacia un punto común de salida, que puede ser un cuerpo de agua interior o el mar” (SEMARNAT, 2013). En este ámbito territorial se establece una interacción dinámica entre los componentes biofísicos (suelo, agua, ecosistemas y relieve), las formas de aprovechamiento humano y las estructuras institucionales que regulan el uso del recurso. Asimismo, la cuenca constituye una unidad fundamental para comprender el funcionamiento del ciclo hidrológico, evaluar los efectos acumulativos de las actividades humanas sobre la cantidad y calidad del agua y analizar la organización jerárquica del sistema hídrico, el cual puede subdividirse en subcuencas (SEMARNAT, 2013).

Las cuencas hidrográficas desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento del ciclo hidrológico, al definir el territorio donde se capta la precipitación y se conduce el escurrimiento hacia sistemas de agua superficiales y subterráneos. Al considerarse unidades territoriales integrales, facilitan la evaluación y cuantificación

de los efectos acumulados derivados de las actividades humanas y otras presiones sobre el ambiente. En el contexto de la administración de las aguas nacionales, la CONAGUA ha delimitado 757 cuencas hidrológicas, cuya gestión resulta clave para asegurar tanto la disponibilidad como la calidad del recurso hídrico en el territorio (SEMARNAT, 2013).

Con fines de administración del agua en México, la CONAGUA delimitó 757 cuencas hidrológicas, de las cuales la mayoría presentaba disponibilidad hídrica según las actualizaciones realizadas conforme a la normativa vigente. Estas cuencas se integran en 37 regiones hidrológicas, que a su vez se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas para facilitar la gestión del recurso hídrico en el país. Dichas regiones funcionan como unidades de referencia para la formulación de políticas públicas, la administración del recurso hídrico y la implementación de obras e intervenciones en materia de infraestructura hidráulica.



FIGURA 3: REGIONES HIDROLÓGICAS-ADMINISTRATIVAS (RHA) Y ACUÍFEROS. CONAGUA, 2024A

En lo que respecta a las aguas superficiales, la red hidrográfica de México alcanza aproximadamente 633 mil kilómetros de extensión e incluye 51 ríos principales que

concentran cerca del 85.7 % del escurrimiento superficial nacional, cuyas cuencas abarcan alrededor del 65 % del territorio continental. Entre las cuencas de mayor superficie destacan las de los ríos Bravo y Balsas, mientras que por su longitud sobresalen los ríos Bravo y el sistema Grijalva-Usumacinta. Asimismo, los ríos Lerma y Nazas-Aguanaval forman parte de la vertiente interior, lo que evidencia la diversidad hidrológica del país (SEMARNAT, 2013). (Figura 4).



FIGURA 4: RÍOS PRINCIPALES DE MÉXICO. CONAGUA, 2024A

Las aguas superficiales desempeñan un papel estratégico en la seguridad hídrica y alimentaria del país, al suministrar recursos indispensables para las actividades agropecuarias, industriales y para diversos usos sociales, recreativos y culturales.

No obstante, este recurso enfrenta problemas estructurales, la reducción de caudales y el estrés hídrico, como resultado de la sobreexplotación y la recurrencia de sequías.

A estos factores se añaden la contaminación derivada de descargas no tratadas, las limitaciones de la infraestructura hidráulica —en muchos casos insuficiente o

deteriorada— y la falta de coordinación en la gestión del agua entre los distintos órdenes de gobierno y sectores productivos (CONAGUA, 2022).

Mientras que, en las aguas subterráneas, están las cuencas hidrográficas donde se localizan los acuíferos, que constituyen reservas estratégicas de agua subterránea esenciales para el equilibrio hídrico y el desarrollo socioeconómico.

Para fines de administración del agua en México, se han delimitado 653 acuíferos, los cuales representan una fuente fundamental de abastecimiento para el consumo humano y para las actividades agrícolas, industriales y domésticas, particularmente en regiones donde las fuentes superficiales son limitadas o presentan alta variabilidad (CONAGUA, 2022).

La relevancia de las aguas subterráneas se refleja en su participación dentro del volumen total concesionado para usos consuntivos, como se muestra en la figura 5, del cual una proporción significativa proviene de estas fuentes, mientras que el resto corresponde a aguas superficiales. La evolución de estos volúmenes evidencia el papel estratégico de ambas fuentes en la gestión hídrica nacional.

En este contexto, la disponibilidad media anual de los acuíferos constituye un indicador clave para la administración y preservación del recurso, lo que ha motivado la implementación de diversos instrumentos regulatorios —como vedas, zonas reglamentadas, reservas y acuerdos de suspensión— orientados a controlar y revertir la sobreexplotación de las aguas subterráneas (CONAGUA, 2024a).

La explotación intensiva de los acuíferos ha provocado un desbalance entre la recarga natural y la extracción de agua subterránea, lo que compromete su disponibilidad en el largo plazo (Martínez & Patiño, 2012). Información oficial indica que la sobreexplotación de los acuíferos en México representa una problemática en expansión que amenaza la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo.

Mientras que en 1975 se identificaban 32 acuíferos en condición de sobreexplotación, para el año 2020 la cifra ascendió a 111, equivalente a cerca del

17 % de los 653 acuíferos registrados a nivel nacional, como se muestra en la figura 5 (CONAGUA, 2024a).

De los 653 acuíferos del país, solo 378 se encontraban en condiciones de disponibilidad, lo que evidencia los retos persistentes para la gestión sostenible de las aguas subterráneas en el país. Podemos decir que, en función de la relación extracción/recarga, se define si los acuíferos se convierten en sobreexplotados o dejan de serlo (CONAGUA, 2024a).

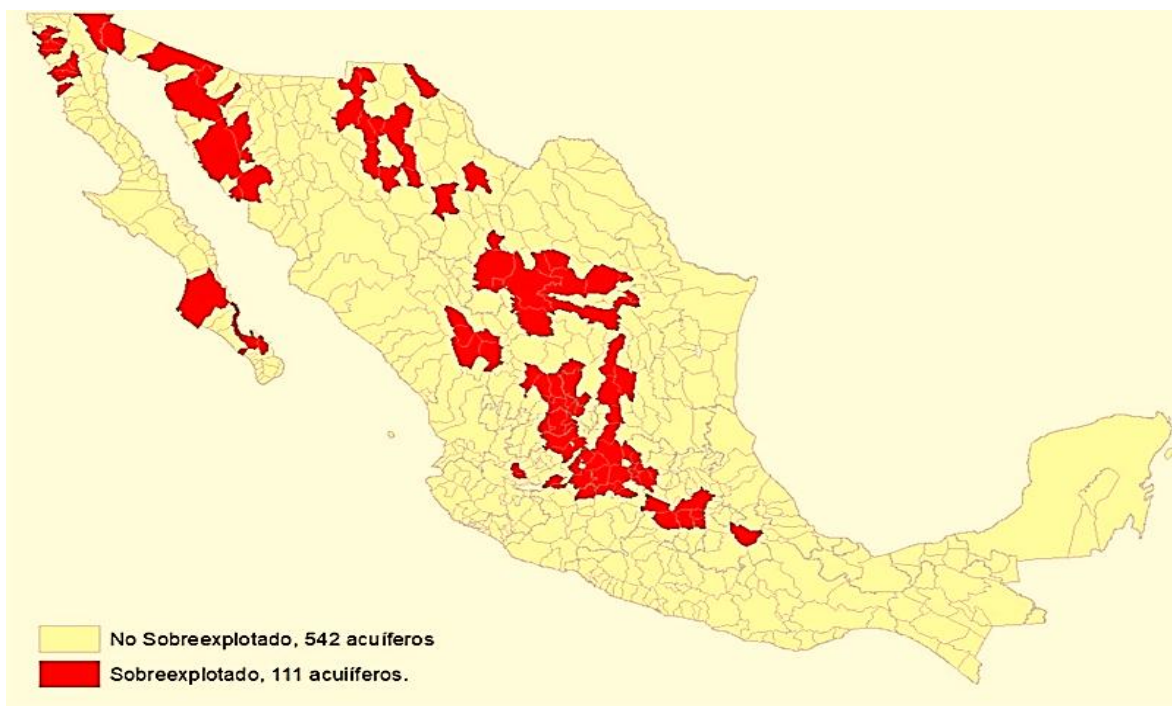


FIGURA 5: ACUÍFEROS SOBREEXPLOTADOS EN 2021 Y 2022. CONAGUA 2024A

En las últimas décadas, el uso de aguas subterráneas se ha incrementado considerablemente, tanto en volumen como en la regularidad con que se extrae. Para el sector agrícola, este recurso ha sido especialmente valioso, ya que permite contar con agua de manera flexible y en el momento en que se necesita para el riego. Aunque este aumento en su aprovechamiento ha favorecido el desarrollo de millones de personas en áreas rurales, también ha traído consecuencias negativas, entre ellas el deterioro paulatino de los acuíferos, la contaminación del agua subterránea y la intrusión salina en acuíferos costeros estratégicos (FAO, 2013).

De acuerdo con el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2015), los recursos hídricos comprenden no solo el agua como tal, sino también los sistemas naturales en los que esta se distribuye y almacena, tales como ríos, lagos y acuíferos, además de la infraestructura hidráulica desarrollada por el ser humano. Dichos recursos son fundamentales para la producción agrícola y el bienestar de la población, ya que su disponibilidad y calidad inciden directamente en el desarrollo económico y la seguridad alimentaria.

2.2.2 Hidrografía del acuífero

El acuífero Valle de San Juan del Río se encuentra en la zona de transición entre las regiones hidrológicas 26 Pánuco y 12 Lerma-Chapala-Santiago. (CONAGUA, 2024).

La infraestructura hidráulica para el aprovechamiento de los escurrimientos superficiales está representada por las presas de almacenamiento que abastecen al Distrito de Riego 023 San Juan del Río: San Ildefonso ubicada al sur del acuífero, Constitución de 1917 y La Llave ubicadas en el centro y La Venta ubicada al noreste; así como las derivadoras Lomo de Toro y Constitución de 1917, ubicadas en la porción central. (CONAGUA, 2024).

El acuífero Valle de San Juan del Río (2203) se localiza al sur del estado de Querétaro, en una zona limítrofe con los estados de Hidalgo, México y Guanajuato. Geográficamente, se encuentra entre los 20°03'25" y 20°42'57" de latitud norte, y los 99°49'53" y 100°21'47" de longitud oeste, con una superficie aproximada de 2,031 km² (CONAGUA, 2024).

La investigación se desarrolló en el valle de San Juan del Río, localizado en el estado de Querétaro, México, aproximadamente en las coordenadas geográficas 20° 29' 12.2" de latitud norte y 99° 44' 49.7" de longitud oeste. El trabajo se delimitó dentro del Distrito de Desarrollo Rural (DDR) 023 San Juan del Río. En esta región hidrológica, el aprovechamiento del agua subterránea se destina

predominantemente a las actividades agrícolas, concentrándose la mayor demanda en la zona central, donde se ubica el Distrito de Riego 023 San Juan del Río.

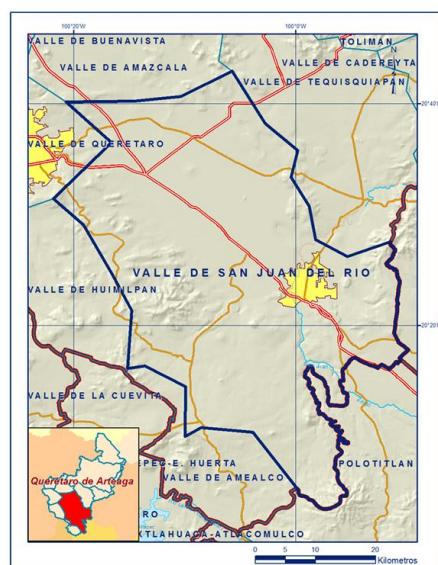


FIGURA 6: LOCALIZACIÓN DEL ACUÍFERO. CONAGUA 2024

En la literatura se ha reconocido que el agua para riego es el insumo que influye en mayor grado sobre los rendimientos de los cultivos (FAO, 2004).

El cambio climático se relaciona con una mayor ocurrencia e intensidad de determinados eventos hidrometeorológicos extremos, lo que puede incrementar la presión sobre los recursos hídricos. A ello se suma el desarrollo de tecnologías de perforación y bombeo de pozos, que ha favorecido una expansión significativa del aprovechamiento de las aguas subterráneas a nivel mundial. Este proceso ha sido denominado por Llamas y Martínez-Santos (2006) como la “revolución silenciosa” del uso intensivo de las aguas subterráneas.

El Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS, 2024) con relación al acuífero valle de San Juan del Río, señala que hay un déficit de disponibilidad de agua subterránea de casi 57 millones de m³.

En México, la administración del agua se rige por la Ley de Aguas Nacionales a través del Plan Nacional Hídrico, el cual asigna a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) la responsabilidad de regular, administrar y gestionar el recurso

mediante políticas, programas y normativas orientadas a su aprovechamiento sostenible (DOF, 2020). Desde una visión integral, la gestión de los recursos hídricos comprende tanto las acciones realizadas por individuos y empresas privadas en sus espacios productivos, como las ejecutadas por instituciones públicas, organizaciones de usuarios y entidades gubernamentales, con el propósito de garantizar la conservación y el adecuado funcionamiento del recurso. En este marco, gestionar el agua implica promover su uso racional, fomentar el ahorro y preservar su calidad (IICA, 2015).

Asimismo, el IICA (2020) sostiene que una gestión eficiente del agua debe considerar la seguridad hídrica como un pilar estratégico del desarrollo sostenible, garantizando la disponibilidad del recurso para distintos usos sin comprometer los ecosistemas ni las necesidades de las generaciones futuras. La gestión del recurso hídrico necesita considerar la participación de todos los participantes y mejores tecnologías.

Dentro de este enfoque, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) se posiciona como un instrumento clave, ya que promueve la coordinación del manejo del agua, la tierra y otros recursos. En este sentido, el IICA señala que la gestión del agua debe incluir hacia tres principios fundamentales: eficiencia, sostenibilidad e inclusión. De igual manera, se reconoce que la sostenibilidad de los sistemas alimentarios depende en gran medida de un manejo responsable del agua en la agricultura, lo que implica avanzar hacia modelos productivos que reduzcan la huella hídrica sin afectar la productividad ni el bienestar rural (IICA, 2021).

Por otra parte, la gestión de los recursos hídricos supone una responsabilidad compartida por lo que debe incluir temas de gobernanza, con la participación responsable de los interesados.

Una gestión adecuada dentro de los predios no solo contribuye a preservar la calidad del agua como bien común, sino que también mejora la rentabilidad productiva y reduce la vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático (IICA, 2015).

En escenarios caracterizados por escasez hídrica o sobreexplotación de acuíferos, como ocurre en diversas regiones de México, la gestión del agua debe incorporar políticas públicas orientadas al uso racional del recurso. El IICA (2020) subraya la importancia de la participación de los usuarios del agua y sus asociaciones.

De igual manera, la gestión del agua requiere evaluar y dar seguimiento a su uso mediante indicadores como la huella hídrica, los cuales permiten identificar áreas críticas dentro de los sistemas productivos y generar información útil para impulsar procesos de reconversión, tecnificación y mejora de prácticas agrícolas. A nivel global, la gestión del recurso hídrico se ha convertido en un tema prioritario, ya que involucra aspectos relacionados con su disponibilidad, distribución y calidad. En este sentido, la formulación de políticas públicas demanda información confiable sobre la extracción, uso y retorno del agua, lo cual contribuye a una mejor planificación del recurso, evita su sobreexplotación y favorece un acceso más equitativo (CEPAL, 2024).

En este contexto, la agricultura continúa siendo el principal usuario del agua, lo que la coloca en una posición vulnerable ante la creciente competencia por el recurso. La disminución en la disponibilidad hídrica, junto con el incremento en la demanda, plantea el reto de mejorar la eficiencia en su uso sin comprometer su calidad (IICA, 2015). Finalmente, el aprovechamiento sostenible del agua requiere considerar las características hidrogeológicas de cada región, con el fin de diseñar estrategias adecuadas para su conservación y uso eficiente (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

2.2.3 Escasez de agua y estrés hídrico

La escasez del agua no solo evidencia un desajuste entre la disponibilidad y la demanda de agua, sino que además provoca efectos sociales, económicos y ambientales. En términos generales, la escasez de agua se presenta cuando la demanda de agua dulce supera la oferta disponible en un territorio determinado (FAO, 2013).

En el contexto actual, la reducción progresiva de las reservas de agua dulce representa una amenaza importante para la economía global, configurándose como un problema de dimensión mundial. Diversos factores contribuyen a esta situación, entre ellos el incremento sostenido de la demanda, el crecimiento de la población, los impactos del cambio climático y las deficiencias en la gestión del recurso hídrico (WWAP, 2015).

Desde una perspectiva conceptual, la FAO (2013) señala que la escasez de agua puede analizarse a partir de distintos factores, entre los que destacan la disponibilidad física del recurso, la capacidad de infraestructura para su aprovechamiento y las condiciones institucionales que regulan su acceso. En este sentido, la escasez no solo depende de la cantidad de agua existente, sino también de la forma en que es gestionada y distribuida.

En esta misma línea, Seckler et al. (1998) distinguen dos tipos principales de escasez: la física y la económica. La primera se presenta cuando el volumen disponible es insuficiente para cubrir la demanda total, incluidos los requerimientos ambientales, lo que puede generar deterioro ecológico y reducción de los niveles de agua subterránea. Por otro lado, la escasez económica se refiere a situaciones en las que, aun existiendo disponibilidad del recurso, el acceso se ve limitado por factores como la infraestructura, la capacidad técnica o las condiciones institucionales, lo que dificulta satisfacer las necesidades de la población y de los sectores productivos.

Asimismo, la escasez hídrica se expresa a través de distintos síntomas, como la incapacidad total o parcial para satisfacer la demanda, la competencia por la cantidad y calidad del recurso, los conflictos entre usuarios, el agotamiento irreversible de las reservas subterráneas y los impactos negativos sobre el medio ambiente (FAO, 2013).

FAO (2023) destaca que la agricultura continuará siendo el principal consumidor de agua en México y el mundo, por lo que es necesario proponer acciones audaces de producción de alimentos con creciente escasez de agua.

El funcionamiento del sector agrícola depende directamente de la disponibilidad de agua. A medida que se intensifica la producción, reduce la disponibilidad para otros usos. Bajo condiciones de escasez hídrica, ya sea por sobreexplotación de las fuentes o por eventos naturales como sequías, la producción agrícola se ve seriamente afectada, lo que pone en riesgo los medios de vida rurales y compromete la seguridad alimentaria (FAO, 2013).

Por otro lado, Falkenmark y Widstrand (1992) señalan que uno de los indicadores más utilizados para medir la escasez de agua a escala nacional es la disponibilidad de agua dulce renovable per cápita. Este indicador se basa en el volumen anual de agua renovable disponible por habitante. La base metodológica de este enfoque radica en estimar cuántas personas pueden sostenerse razonablemente con una determinada unidad de recursos hídricos (Falkenmark, 1984).

2.3 Escasez hídrica y productividad del agua en la gestión agrícola

Allan (2006) señala que dos supuestos ampliamente difundidos —la idea de que la construcción de presas resolverá la crisis del agua y la creencia de que un mayor suministro hídrico se traduce automáticamente en mayores rendimientos agrícolas— simplifican en exceso la complejidad del sistema hidro-económico global. Esta perspectiva se complementa con los planteamientos de Rijsberman (2006) y de Mekonnen y Hoekstra (2016), quienes sostienen que la escasez de agua a escala mundial responde principalmente a un desajuste espacial y temporal entre la oferta y la demanda, donde la distribución regional y estacional del recurso no coincide con los requerimientos reales de uso.

A pesar de que la presión sobre el recurso está fuertemente asociada a la demanda, diversos estudios continúan enfatizando la necesidad de fortalecer la oferta mediante soluciones de carácter técnico. En este sentido, Wanders y Wada (2015) proponen la construcción de infraestructuras de almacenamiento para asegurar reservas durante periodos críticos; por su parte, Kellner (2019) destaca, en el caso de Suiza, la importancia de modernizar y ampliar la capacidad de almacenamiento;

mientras que Liu et al. (2019) sugieren optimizar las redes de distribución hídrica a escalas regional y global.

Kahil et al. (2019) proponen el uso de enfoques de modelación integrados que articulen los sistemas hídrico, energético y agrícola, con el fin de analizar de manera conjunta las estrategias de gestión tanto de la oferta como de la demanda. Este enfoque permite evaluar las interrelaciones y compensaciones existentes entre los objetivos económicos, sociales y ambientales, favoreciendo una toma de decisiones más equilibrada en la planificación y gestión de los recursos.

Más allá de las discusiones conceptuales, Hogeboom (2020) subraya la necesidad de implementar respuestas coordinadas frente a la escasez, la contaminación y el agotamiento de los recursos de agua dulce, entendidos como una responsabilidad colectiva orientada a proteger este recurso esencial para las generaciones actuales y futuras. En contextos donde la disponibilidad de agua superficial se reduce, los productores agrícolas tienden a incrementar su dependencia de las fuentes subterráneas como alternativa para sostener la producción.

Llamas y Martínez (2004), junto con Scott y Shah (2004), caracterizan este proceso como una “revolución silenciosa”, asociada a la expansión del riego mediante agua subterránea. Dicho fenómeno ha sido favorecido por los bajos costos de bombeo — en muchos casos subsidiados—, la accesibilidad a los acuíferos y los elevados rendimientos económicos, lo que ha incentivado la perforación intensiva de pozos y la incorporación de equipos de bombeo. Como resultado, la superficie bajo riego se ha incrementado de manera acelerada, aun cuando ello ha implicado mayores costos energéticos.

De acuerdo con Liu et al. (2017) y Mekonnen y Hoekstra (2016), esta tendencia ha contribuido a un aumento considerable en la extracción mundial de aguas subterráneas, comprometiendo la sostenibilidad de los acuíferos. Frente a esta presión, Scheierling et al. (2014) plantean la necesidad de maximizar la productividad del agua como estrategia para optimizar los beneficios netos,

disminuir la dependencia de recursos hídricos no renovables y fomentar un uso más eficiente en un contexto de creciente escasez.

La regulación del uso del agua enfrenta desafíos estructurales de alta complejidad. En el caso de Guanajuato, Sandoval (2004) plantea la necesidad de fortalecer la participación social y desarrollar programas de capacitación como respuesta a la sobreextracción de agua subterránea que excede la recarga anual, en un contexto de limitada intervención gubernamental. No obstante, Hoogesteger et al. (2017) evidencian que la interacción entre la regulación estatal, los mercados informales de agua subterránea, los costos energéticos asociados al bombeo y los mecanismos de autorregulación de los usuarios ha restringido la efectividad de estas iniciativas, lo que pone de manifiesto la necesidad de políticas socioambientales integrales y coherentes.

La seguridad alimentaria y el crecimiento demográfico intensifican la urgencia de intervención. Singh (2014) destaca la importancia de planificar y gestionar el riego bajo criterios de eficiencia, mientras que Scott y Shah (2004) proponen vincular el costo de la energía eléctrica al control de la extracción subterránea, con el fin de desincentivar la sobreexplotación. Esta necesidad se acentúa ante la evidencia reportada por la ONU (2023), que señala una disminución sostenida de los recursos hídricos renovables per cápita como consecuencia del desequilibrio entre la oferta natural y la creciente demanda de origen humano.

2.4 La productividad del agua y la agricultura

La productividad del agua en el ámbito agrícola, entendida como la cantidad de producción obtenida por unidad de agua empleada, permite orientar la toma de decisiones en la gestión agronómica, la innovación tecnológica y el diseño de políticas hídricas. Este enfoque, sustentado en la teoría microeconómica del producto marginal y en modelos de optimización, supera las mediciones

estrictamente volumétricas al ofrecer métricas más precisas de eficiencia en el uso del recurso (Scheierling et al., 2014; Young y Loomis, 2014).

Desde una perspectiva teórica, Scheierling et al. (2014) demostraron que la optimización del rendimiento por unidad de volumen de agua no solo contribuye a mejorar los beneficios netos de las unidades productivas, sino que también convierte la escasez hídrica en un incentivo para la adopción de tecnologías y prácticas de riego orientadas a una mayor eficiencia en el uso del recurso.

La denominada “revolución silenciosa” del riego subterráneo, documentada por Llamas y Martínez (2004), así como por Scott y Shah (2004), ha reconfigurado los sistemas productivos en zonas áridas y semiáridas mediante el aprovechamiento del acceso relativamente sencillo a los acuíferos y los bajos costos de bombeo. Este proceso ha favorecido la expansión de la superficie bajo riego, elevando la productividad agrícola y los ingresos rurales.

Ante esta problemática, Scott y Shah (2004) plantearon la necesidad de vincular las tarifas eléctricas del bombeo con instrumentos de gestión hídrica que reflejen la escasez real del recurso y desincentiven extracciones excesivas. Sin embargo, Hoogesteger et al. (2017), a partir del caso de Guanajuato, evidencian que, sin una adecuada articulación entre regulación estatal, mercados de agua, costos energéticos y mecanismos de autorregulación de los usuarios, las mejoras tecnológicas y tarifarias resultan insuficientes para sostener la productividad en el tiempo. En contraste, Kang et al. (2017) demostraron en China que incrementos marginales en la eficiencia del riego tecnificado pueden traducirse en mejoras significativas de la productividad a escala de cuenca, contribuyendo de manera relevante a la seguridad alimentaria.

En el caso de México, el Programa Nacional Hídrico define la productividad del agua como la relación entre la producción agrícola total y el volumen de agua aplicado, expresada en kg/m^3 (CONAGUA, 2020b), indicador práctico pero centrado principalmente en el análisis volumétrico. En esta línea, Pineda (2019) evidenció que la introducción de variedades de trigo con mayor eficiencia hídrica, combinada

con ajustes en las políticas agrícolas, puede elevar de forma significativa la productividad bajo condiciones de restricción del recurso. De manera complementaria, Rodríguez-Flores et al. (2019) usaron modelos construidos basados en la programación matemática positiva para reasignar el agua con de escasez.

Botello-Aguillón et al. (2022) aplicaron modelos para estimar precios sombra y diseñar esquemas tarifarios vinculados a la huella hídrica, con el propósito de mejorar la productividad del agua, optimizando simultáneamente la eficiencia económica y la equidad en la asignación del recurso.

En el Distrito de Riego 028 Tulancingo, Torres et al. (2020) plantearon una reasignación estratégica del recurso hídrico hacia cultivos con mayor rentabilidad, lo que permitió optimizar los beneficios económicos bajo distintos escenarios de disponibilidad. Este enfoque logró incrementar la productividad del agua sin comprometer la diversidad productiva del sistema agrícola.

De manera similar, en el Distrito de Riego 100 Alfajayucan, Martínez-Luna et al. (2021) estimaron el valor económico del agua considerando distintos grados de escasez y determinaron configuraciones óptimas de uso. Sus resultados evidenciaron que priorizar cultivos con mayor valor económico y menor requerimiento hídrico no solo mejora la productividad del agua, sino que también incrementa los ingresos agrícolas, destacando que las soluciones óptimas pueden variar significativamente según las condiciones de disponibilidad del recurso.

Hernández-Pérez et al. (2025), utilizando un modelo de programación lineal, analizaron los impactos de reducir en 50% la asignación de agua en el Distrito de Riego 003 Tula, Hidalgo. Sus resultados mostraron que el precio sombra del recurso aumentó en 42%, mientras que la superficie cultivada se contrajo en la misma proporción.

En conjunto, la evidencia empírica indica que la productividad del agua, se ha consolidado como un indicador estratégico para convertir la escasez en un motor de innovación.

2.5 El agua y la agricultura

El acceso al agua en México representa un reto estratégico para conseguir la equidad. La problemática de escasez de agua responde a un conjunto de factores interrelacionados, entre los que destacan el desajuste entre disponibilidad y demanda, los procesos de contaminación, las limitaciones en la gestión del recurso y los impactos asociados al cambio climático (IMCO, 2023).

Un caso representativo se registró en 2021, cuando el país experimentó uno de los episodios de sequía más severos de las últimas décadas, provocando una disminución cercana al 30% en los niveles de almacenamiento de las presas. Esta situación repercutió de manera directa en la producción agrícola, reduciendo el desempeño económico del sector y elevando los precios de los productos agropecuarios como consecuencia de la limitada disponibilidad de agua y las condiciones climáticas desfavorables (BANXICO, 2022; CONAGUA, 2022).

Asimismo, la disponibilidad de agua está determinada tanto por factores naturales como por presiones de origen humano. Se estima que, por cada 100 litros de precipitación, aproximadamente el 72% se pierde mediante evapotranspiración, solo el 6% contribuye a la recarga de acuíferos y el 22% restante se transforma en escorrentía superficial, gran parte de la cual circula a través de cuerpos de agua con distintos niveles de contaminación (CONAGUA, 2022; SEMARNAT, 2018).

Este desequilibrio ha provocado una reducción aproximada del 20% en la disponibilidad de recursos hídricos renovables per cápita desde el año 2000, afectando particularmente a las comunidades rurales y a los pequeños productores (ONU, 2023). A este escenario se suman el crecimiento poblacional, la expansión urbana desordenada, así como la sobreexplotación y contaminación de acuíferos. En especial, el sector agrícola —responsable del uso de cerca del 75% del agua a nivel nacional— presenta una eficiencia promedio de apenas 47%, lo que intensifica la presión sobre el recurso y compromete su sostenibilidad a largo plazo (CONAGUA, 2021b; IMTA, 2022a).

Las proyecciones institucionales evidencian la necesidad de implementar acciones inmediatas. El Plan Nacional Hídrico 2020–2024 estimaba que, hacia 2050, las extracciones de agua podrían incrementarse en aproximadamente 55%, impulsadas por el requerimiento de elevar la producción de alimentos en cerca de 70%. No obstante, esta meta enfrenta importantes restricciones técnicas, ya que alrededor del 75% de las unidades agrícolas emplean riego por gravedad, sistema que registra pérdidas de entre 40% y 50%. A ello se añade que cerca del 64% de la infraestructura de conducción corresponde a canales de tierra sin revestimiento, lo que reduce significativamente la eficiencia en el uso del agua (CEDRSSA, 2021; CONAGUA, 2020).

En el estado de Guanajuato, el panorama presenta condiciones igualmente críticas. Aproximadamente el 93% de las unidades productivas utilizan sistemas de riego por gravedad o rodado, con predominio de tuberías de compuerta (59%) y canales de tierra (37%), mientras que únicamente el 7% ha incorporado tecnologías de riego más eficientes (INEGI, 2019b).

La sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos representa uno de los principales desafíos en la gestión del agua. Entre 2001 y 2020, el número de concesiones destinadas a la extracción de agua subterránea aumentó en 42.4%, superando el crecimiento registrado en fuentes superficiales, que fue de 23.2% (CONAGUA, 2022). Esta problemática se intensifica en la Región Hidrológica Administrativa Lerma–Santiago–Pacífico, la cual concentra cerca del 20% del consumo hídrico nacional, pese a disponer únicamente del 2% del agua renovable. En esta región, aproximadamente el 27% de las cuencas presentan condiciones de sobreexplotación, mientras que la extracción de agua subterránea registró un incremento anual acumulado de 5.8 millones de m³ entre 2008 y 2020 (CONAGUA, 2021b; IMCO, 2023).

El estado de Guanajuato representa un caso ilustrativo de la intensa presión sobre los recursos hídricos. Para 2020, el índice de presión hídrica alcanzó 104.5%, con proyecciones que estiman un incremento hasta 122% hacia el año 2030 (CONAGUA, 2021a; 2022). Durante el ciclo agrícola 2018–2019, únicamente el

21.2% de la superficie con infraestructura de riego en la entidad recibió efectivamente agua, mientras que el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma —que concentra el 3.5% de la superficie nacional bajo riego— ha experimentado reducciones progresivas en su capacidad operativa (CEDRSSA, 2021).

Frente a esta problemática de carácter multidimensional, resulta indispensable implementar políticas estructurales sustentadas en información confiable y evidencia empírica. El IMCO (2023) advierte que, de no adoptarse medidas inmediatas, México podría enfrentar riesgos significativos para la seguridad alimentaria, la estabilidad de los ecosistemas y el desarrollo de las economías locales. En este contexto, las estrategias de solución deben orientarse hacia la modernización de la infraestructura hidráulica, el fortalecimiento de los mecanismos de gobernanza y la implementación de esquemas tarifarios que incorporen los costos reales de extracción, tratamiento y distribución del agua. Asimismo, se requiere impulsar inversiones destinadas a ampliar la cobertura y optimizar la eficiencia de las redes de suministro (CONAGUA, 2021b; IMCO, 2023).

2.5 Huella hídrica

En las últimas décadas, la creciente presión sobre los recursos hídricos ha impulsado el desarrollo de indicadores capaces de evaluar el uso del agua desde una perspectiva integral. En este contexto, surge el concepto de huella hídrica como una herramienta que permite cuantificar el volumen total de agua dulce utilizado directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios, incorporando tanto el consumo como la contaminación del recurso (Hoekstra, 2003). Este enfoque representa un cambio respecto a los métodos tradicionales, los cuales se limitaban a medir la extracción de agua por sector sin considerar su uso a lo largo de las cadenas productivas.

De manera complementaria, el enfoque de huella hídrica introduce el concepto de agua virtual, entendido como el volumen de agua utilizado durante todo el proceso de producción de un bien o servicio, independientemente del lugar donde se consuma dicho producto (Hoekstra & Chapagain, 2008). Esta perspectiva permite

analizar la relación entre producción, comercio y disponibilidad hídrica, evidenciando cómo los patrones de consumo influyen en la presión sobre los recursos hídricos a escala global.

Asimismo, la huella hídrica se ha consolidado como un indicador clave en el análisis de sostenibilidad, ya que permite evaluar la apropiación humana del agua, los impactos sobre los ecosistemas y la disponibilidad futura del recurso (Hoekstra et al., 2011). En consecuencia, su aplicación resulta fundamental para comprender la dinámica del uso del agua en sistemas productivos y orientar estrategias hacia una gestión más eficiente y sostenible.

El concepto de huella hídrica fue propuesto inicialmente por Hoekstra (2003) en el marco del análisis del comercio internacional de agua virtual. Posteriormente, el enfoque evolucionó hacia un marco metodológico más amplio que permite evaluar el uso del agua a nivel de producto, proceso, región o país (Hoekstra et al., 2011). Esta evolución respondió a la necesidad de comprender no solo cuánto agua se utiliza, sino también dónde, cómo y con qué impactos se emplea el recurso hídrico.

A partir de este desarrollo, la huella hídrica comenzó a utilizarse como un indicador para evaluar la sostenibilidad del uso del agua, integrando dimensiones ambientales, sociales y económicas (Vanham et al., 2013). De este modo, el enfoque trascendió el análisis cuantitativo del consumo hídrico para incorporar aspectos relacionados con la eficiencia, la equidad en el acceso al recurso y la conservación de los ecosistemas.

En términos generales, la consolidación del enfoque ha permitido vincular el uso del agua con la seguridad alimentaria, el comercio internacional, la planificación territorial y la gestión integrada de los recursos hídricos (Mekonnen & Hoekstra, 2011). En consecuencia, la huella hídrica se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis de sostenibilidad hídrica a múltiples escalas.

La huella hídrica se compone de tres elementos fundamentales que permiten diferenciar el origen del agua utilizada y el impacto generado por su uso: huella

hídrica verde, azul y gris (Hoekstra et al., 2011). Esta clasificación facilita el análisis de la presión sobre el recurso hídrico y permite identificar oportunidades de mejora en la eficiencia del uso del agua.

En primer lugar, la huella hídrica verde corresponde al agua proveniente de la precipitación que se almacena en el suelo y es utilizada por las plantas mediante evapotranspiración (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Este componente resulta especialmente relevante en sistemas agrícolas de temporal, donde la producción depende directamente del agua de lluvia.

En segundo lugar, la huella hídrica azul representa el volumen de agua superficial o subterránea extraída de ríos, lagos o acuíferos para su uso en procesos productivos (Hoekstra et al., 2011). Este tipo de huella implica competencia directa entre sectores, especialmente en regiones con estrés hídrico.

La huella hídrica gris se define como el volumen de agua necesario para diluir contaminantes hasta cumplir con estándares de calidad establecidos (Hoekstra et al., 2011). Este componente permite evaluar el impacto de las actividades productivas sobre la calidad del agua y los ecosistemas.

El análisis de la huella hídrica ha adquirido relevancia a nivel internacional debido a su capacidad para vincular el uso del agua con la sostenibilidad ambiental y la seguridad alimentaria (FAO, 2013). Este indicador permite evaluar la presión sobre los recursos hídricos, identificar patrones de consumo y analizar la dependencia hídrica de los países.

Además, la huella hídrica facilita la evaluación del comercio internacional de agua virtual, evidenciando cómo los flujos comerciales redistribuyen el uso del agua a escala global (Hoekstra & Chapagain, 2008). En este sentido, el enfoque contribuye a comprender la relación entre producción, consumo y disponibilidad hídrica.

Desde una perspectiva de política pública, la huella hídrica proporciona información relevante para el diseño de estrategias orientadas al manejo sostenible del recurso

hídrico, permitiendo identificar sectores con alta demanda de agua y evaluar la eficiencia en su uso (Vanham et al., 2013).

La metodología de evaluación de la huella hídrica propuesta por la Water Footprint Network establece un marco analítico para cuantificar el uso del agua considerando su origen, consumo e impacto (Hoekstra et al., 2011). Este enfoque permite calcular la huella hídrica a nivel de producto, proceso, productor o región.

El cálculo se basa en la estimación del volumen total de agua utilizada durante el ciclo productivo, incluyendo el agua evaporada, incorporada al producto o utilizada para diluir contaminantes (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Este procedimiento permite identificar puntos críticos en las cadenas productivas y evaluar oportunidades de mejora en la eficiencia hídrica.

Asimismo, la metodología incorpora un análisis de sostenibilidad que evalúa si el uso del agua ocurre dentro de los límites de disponibilidad del recurso y si se respetan los requerimientos ambientales (Hoekstra et al., 2011). Este enfoque permite analizar la viabilidad ambiental y social del uso del agua.

Desde una perspectiva de sostenibilidad, la huella hídrica permite evaluar el uso del agua considerando dimensiones ambientales, sociales y económicas (Vanham et al., 2013). Este enfoque integral facilita la identificación de prácticas productivas más sostenibles.

En términos ambientales, el indicador permite analizar la presión sobre los ecosistemas y la disponibilidad futura del recurso (Hoekstra et al., 2011). Desde el punto de vista social, contribuye a evaluar la equidad en el acceso al agua y los conflictos entre usuarios. Mientras que, en el ámbito económico, permite analizar la eficiencia en el uso del recurso hídrico (FAO, 2013). El sector agrícola es el mayor consumidor de agua a nivel mundial, por lo que la evaluación de la huella hídrica resulta fundamental en este ámbito (FAO, 2013). En sistemas agrícolas, la mayor parte del consumo corresponde a la huella hídrica verde, seguida de la azul en sistemas de riego intensivo (Mekonnen & Hoekstra, 2011).

La aplicación de este indicador permite evaluar la eficiencia en el uso del agua, comparar sistemas productivos e identificar prácticas agrícolas más sostenibles (Hoekstra et al., 2011). Además, facilita el análisis de la contaminación del agua asociada al uso de fertilizantes y agroquímicos (FAO, 2013).

Diversos estudios han aplicado el enfoque de huella hídrica para analizar el uso del agua en sistemas productivos y cadenas de suministro (Mekonnen & Hoekstra, 2011). Estas investigaciones han permitido identificar patrones de uso, evaluar impactos ambientales y analizar la relación entre producción y disponibilidad hídrica.

Con el objetivo de mejorar la comparabilidad de resultados y reforzar la solidez metodológica existe la norma ISO 14046. Este estándar define los lineamientos fundamentales para evaluar la huella hídrica dentro del enfoque del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Además de cuantificar el uso del recurso, incorpora la valoración de los impactos potenciales derivados de su extracción, consumo y deterioro, lo que contribuye a optimizar la eficiencia en el uso del agua dentro de los procesos productivos y a sustentar la toma de decisiones ambientales con base técnica (ISO, 2014).

En concordancia con lo anterior, la ISO 14046 se articula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente con el ODS 6: *Agua limpia y saneamiento*, al fomentar prácticas orientadas a mejorar la disponibilidad del recurso y disminuir los efectos ambientales sobre las comunidades y los ecosistemas (ISO, 2025). Así, más allá de limitarse a la medición de volúmenes de agua, esta norma permite analizar los impactos potenciales asociados tanto al consumo como a la degradación del recurso, considerando factores como el estrés hídrico y la disponibilidad restringida en determinadas cuencas (ISO, 2014).

La evaluación de la huella hídrica, se sustenta en los lineamientos de las normas ISO 14040 e ISO 14044, que establecen los principios del Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Asimismo, diversos conceptos y metodologías desarrollados para cuantificar el uso de recursos y los impactos ambientales derivados de las actividades

humanas han aportado herramientas complementarias, tales como la “huella ecológica” (Rees, 1992), el concepto de “agua virtual” (Allan, 1998) y, de manera central, la propia “huella hídrica” (Hoekstra, 2003).

CUADRO 1: EVOLUCIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA

Huella ecológica (Rees, 1992)	Objetivo: Determinar la extensión de terreno requerida para alcanzar un desarrollo sostenible en una sociedad, considerando tanto la producción de los bienes consumidos por la población como la capacidad de absorción de los desechos generados. Metodología: Se basa en el análisis de los rendimientos de productos primarios —como cultivos, bosques, pesca, entre otros— para estimar la superficie necesaria que pueda sostener determinada actividad económica o social.
Agua virtual (Allan, 1998)	Objetivo: Identificar la cantidad de agua incorporada en productos considerados “caros en agua”, especialmente aquellos elaborados en países que enfrentan estrés hídrico, tomando como referencia el uso evaporativo del recurso hídrico en actividades agrícolas u otras a lo largo de su ciclo de vida. Metodología: Se centra en el análisis de los flujos comerciales, evaluando las importaciones y exportaciones de productos “caros en agua” para determinar su impacto hídrico y la transferencia virtual de agua entre países.
Huella hídrica (Hoekstra, 2002)	Objetivo: Cuantificar el volumen de agua utilizado por un consumidor, un producto, una empresa o una región geográfica, considerando sus distintos componentes: azul, verde y gris. Metodología: Se desarrolla en tres fases principales: primero, la definición del objetivo y el alcance del estudio; posteriormente, la contabilidad del consumo de agua; y finalmente, la formulación de la respuesta o recomendaciones. Este enfoque es ampliamente aplicado por la iniciativa internacional Water Footprint Network (WFN).
Evaluación de la sustentabilidad - WFN	Objetivo: Ampliar la metodología de la Water Footprint Network (WFN) con el fin de proporcionar información adicional que considere también los aspectos económicos y sociales vinculados al uso del agua. Metodología: Se basa en la comparación del agua azul con los recursos superficiales y subterráneos, así como del agua gris con la capacidad de

(Hoekstra, 2011)	la cuenca para asimilar la contaminación. Adicionalmente, incluye un análisis de la eficiencia en el uso del recurso y evalúa si los impactos se distribuyen de manera equitativa entre los distintos actores involucrados.
Huella de agua (ISO 14046, 2014)	Objetivo: Estimar los impactos potenciales asociados con el uso del agua a lo largo del ciclo de vida de un producto, considerando sus efectos sobre los ecosistemas, la salud humana y los recursos disponibles. Metodología: Se desarrolla a través de cuatro fases iterativas: primero, la definición del objetivo y el alcance del estudio; segundo, el análisis del inventario de la huella de agua; tercero, la evaluación de los impactos asociados; y finalmente, la interpretación de los resultados. Esta metodología puede aplicarse como parte de un estudio integral de análisis del ciclo de vida o de manera independiente.

Fuente: Elaboración propia con información ISO 14046 en América Latina. Análisis y recomendaciones para una coherencia regional (2016).

Independientemente de la metodología utilizada, la evaluación de la HH es de gran interés para determinar en cada uno de los sectores tanto agrícola, pecuario y ganadero.

La estimación de la huella hídrica de los productos característicos de cada región puede favorecer un manejo más eficiente de los recursos hídricos a escala local. En este contexto, el planteamiento desarrollado por Hoekstra et al. (2011) constituye una propuesta de alcance internacional que ofrece un marco metodológico homogéneo para la evaluación de este indicador.

Dicha herramienta integral está orientada a fortalecer la gestión sostenible del agua mediante la generación de información precisa sobre su uso, consumo y niveles de contaminación en distintos ámbitos, desde el individual y comunitario hasta el productivo, abarcando sectores como el agrícola, industrial y de servicios.

De igual manera, fomenta prácticas de aprovechamiento responsable del recurso, promueve la transparencia en su administración y respalda la implementación de estrategias sostenibles destinadas a reducir los efectos ambientales y sociales asociados a su utilización (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica se expresa como el volumen de agua empleado por unidad de producto. Este indicador permite representar el total de agua consumida a lo largo del proceso productivo asociado a la obtención del bien (Hoekstra et al., 2011). A escala mundial, se calcula que la huella hídrica anual asciende a aproximadamente 9,087 Gm³. De este total, cerca del 74 % corresponde a huella verde, el 11 % a huella azul y el 15 % a huella gris. Asimismo, alrededor del 92 % del volumen total se vincula con actividades del sector agrícola, lo que evidencia el papel predominante de esta actividad en el uso global del recurso hídrico (AgroDer, 2012).

A nivel internacional, el enfoque ha sido utilizado para evaluar la sostenibilidad del uso del agua en la agricultura, la industria y el consumo doméstico (Vanham et al., 2013). Estos estudios destacan la utilidad del indicador para la planificación del recurso hídrico.

En América Latina, los estudios sobre huella hídrica han enfatizado la importancia del indicador para la gestión del recurso hídrico en regiones con estrés hídrico (FAO, 2013). En México, diversas investigaciones han aplicado el enfoque para evaluar la sostenibilidad del uso del agua en la agricultura.

Estos estudios han permitido identificar cultivos con alta demanda hídrica, analizar la eficiencia en el uso del recurso y proponer estrategias de manejo más sostenibles (CONAGUA, 2020). Asimismo, han evidenciado la importancia de integrar el enfoque de huella hídrica en la planificación hídrica nacional.

A escala regional, las investigaciones han permitido analizar la dinámica del uso del agua en sistemas productivos específicos, evaluar la eficiencia hídrica y proponer medidas para reducir la presión sobre el recurso (Hoekstra et al., 2011). Estos estudios destacan la utilidad de la huella hídrica como herramienta para la toma de decisiones y la gestión sostenible del agua, especialmente en regiones con escasez hídrica (FAO, 2013).

A pesar del avance del enfoque de huella hídrica, aún existen vacíos relacionados con la integración de indicadores socioeconómicos, la evaluación de impactos

locales y la incorporación de variabilidad climática en los análisis (Vanham et al., 2013). Asimismo, se requiere mayor investigación a escala regional para evaluar la sostenibilidad del uso del agua en sistemas agrícolas específicos (Hoekstra et al., 2011).

La huella hídrica constituye un indicador integral que permite evaluar el uso del agua desde una perspectiva de sostenibilidad, incorporando tanto el consumo como la contaminación del recurso (Hoekstra et al., 2011). Su aplicación facilita la identificación de oportunidades para mejorar la eficiencia hídrica y reducir impactos ambientales.

Además, el enfoque proporciona información relevante para la formulación de políticas públicas, la gestión del recurso hídrico y la planificación del desarrollo sostenible, especialmente en contextos de creciente presión sobre el agua (FAO, 2013). En un contexto de creciente escasez de agua, la incorporación de este enfoque resulta esencial para avanzar hacia modelos de desarrollo sostenible y garantizar la disponibilidad del recurso para las generaciones futuras (FAO, 2013; Hoekstra et al., 2011).

El análisis de la huella hídrica surge a partir del concepto de *agua virtual*, introducido por Allan (1998), quien planteó que los bienes y productos incorporan volúmenes significativos de agua a lo largo de su proceso productivo. Posteriormente, Hoekstra (2003) formalizó el término *huella hídrica* como un indicador que permite cuantificar el volumen total de agua dulce utilizada directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios. Este enfoque se consolidó con el desarrollo metodológico propuesto por Hoekstra et al. (2009, 2011), quienes establecieron la distinción entre huella hídrica verde, azul y gris, así como los procedimientos para su evaluación a diferentes escalas.

A nivel global, diversos estudios han aplicado este enfoque para evaluar el uso del agua en sistemas productivos. Mekonnen y Hoekstra (2010, 2012) estimaron la huella hídrica mundial de productos agrícolas y pecuarios, evidenciando que la

producción de alimentos concentra la mayor parte del consumo de agua dulce, particularmente en productos de origen animal. Investigaciones posteriores proyectaron tendencias futuras del uso del agua, señalando que el crecimiento poblacional, los cambios en los patrones de consumo y el desarrollo económico incrementarán la presión sobre los recursos hídricos (Ercin & Hoekstra, 2014). No obstante, algunos autores han señalado limitaciones conceptuales y metodológicas del indicador, particularmente en su interpretación para la toma de decisiones en política hídrica (Wichelns, 2017).

De acuerdo con AgroDer (2012), la mayor proporción de la huella hídrica verde en México se origina en las actividades agrícolas, que concentran alrededor del 76 %, mientras que el 24 % restante corresponde al pastoreo. En lo que respecta a la huella hídrica azul, esta se vincula principalmente con el riego agrícola, que representa aproximadamente el 85 % del total, mientras que la participación del sector industrial es marginal, cercana al 1 %. Por su parte, cerca de la mitad de la huella hídrica gris está asociada a la producción agrícola, lo que evidencia la influencia de este sector en la calidad del recurso hídrico.

En términos de consumo per cápita, México se ubica en la posición 49 a nivel mundial, con un promedio anual de 1,978 m³ por habitante, cifra que supera el promedio global estimado en 1,385 m³ por persona, lo cual refleja la elevada presión que enfrenta el país sobre sus recursos hídricos (AgroDer, 2012).

La huella hídrica ha sido ampliamente utilizada para evaluar la sostenibilidad del uso del agua en cultivos, en México, diversos estudios han aplicado esta metodología a diferentes cultivos.

Ríos et al. (2015) estimaron la huella hídrica de los cultivos forrajeros en el DR-017 mediante el uso de indicadores de eficiencia y productividad, identificando una alta participación de la huella azul en zonas de riego intensivo. Sus hallazgos evidenciaron que, aun cuando estos cultivos ocupaban cerca de la mitad de la superficie agrícola y concentraban la mayor parte del consumo de agua subterránea

disponible, únicamente generaban alrededor de un tercio del valor bruto de la producción. No obstante, dentro de este grupo, el maíz y el sorgo forrajero destacaron por presentar mayor eficiencia productiva y una menor huella hídrica azul, lo que sugiere un desempeño más favorable en términos de sostenibilidad del uso del agua (Ríos et al., 2015).

Vázquez y Lambarri (2017) calcularon la huella hídrica azul correspondiente a 26 cultivos en el Distrito de Riego 011, ubicado en Guanajuato, para el año 2014, distinguiendo el origen del agua entre fuentes superficiales y subterráneas. Los resultados indicaron un consumo total de 287.39 hm³, donde únicamente seis cultivos concentraron el 96 % del volumen utilizado. Asimismo, del total de agua empleada en la producción, el 58 % provino de fuentes superficiales, mientras que el 42 % restante tuvo origen subterráneo (Vázquez & Lambarri, 2017).

Peñaloza et al. (2020) analizaron la huella hídrica de los cultivos de tomatillo y cebolla en el municipio de Atlixco, Puebla, tomando en cuenta los ciclos agrícolas y las condiciones climáticas registradas durante 2017. Los resultados evidenciaron que la cebolla correspondiente al ciclo primavera-verano presentó una huella hídrica superior en comparación con la cebolla de otoño-invierno y con el cultivo de tomatillo, lo cual se explicó por la variabilidad estacional y las diferencias en los niveles de rendimiento. Asimismo, la estimación incorporó los componentes verde, azul y gris, calculados a partir de la evapotranspiración del cultivo y del uso de fertilizantes (Peñaloza et al., 2020).

Cereceres (2021) estimó la huella hídrica asociada a la producción de sotol en el estado de Chihuahua mediante el uso del programa Cropwat 8.0. Los hallazgos mostraron que este sistema productivo se sustenta casi completamente en el aprovechamiento del agua pluvial, dado que la huella hídrica verde concentró más del 99 % del total, mientras que las fracciones azul y gris tuvieron una participación mínima (Cereceres, 2021).

Botello et al. (2024) analizaron los componentes azul, verde y gris de la huella hídrica en 14 cultivos del Distrito de Riego 011, ubicado en la región del Bajío, con el objetivo de identificar oportunidades para incrementar la eficiencia en el uso del agua. Los resultados evidenciaron que los mayores valores promedio de huella hídrica correspondieron a los cultivos de cacahuete, frijol y nopal, mientras que algunas hortalizas, como lechuga, tomate de cáscara y zanahoria, registraron los niveles más bajos. Asimismo, se observó que, aunque el maíz y el trigo concentraron cerca del 74 % de la huella hídrica total del distrito, su contribución al volumen total de producción fue relativamente inferior, con participaciones de 53 % y 22 %, respectivamente (Botello et al., 2024).

El uso de mejores tecnologías, que eleven rendimientos y mejoren la aplicación del riego, mejoran los valores la huella hídrica y, al mismo tiempo. De igual forma, el manejo adecuado de fertilizantes y plaguicidas permite reducir de manera importante la huella hídrica gris, al minimizar la contaminación asociada a la producción agrícola (Botello et al., 2024).

Garay et al. (2022) analizaron la huella hídrica de 12 ingenios azucareros ubicados en la cuenca del Papaloapan y reportaron valores comprendidos entre 239 y 328 m³ t⁻¹, evidenciando que la caña de azúcar presenta una mayor demanda hídrica en comparación con otros cultivos del país. Las diferencias encontradas se atribuyen al rendimiento por hectárea y a la evapotranspiración anual. Asimismo, los autores señalaron que los ingenios con mayor extensión territorial tienden a tener un menor control sobre sus procesos productivos, lo que indica que incrementar la eficiencia y optimizar las prácticas de manejo podría contribuir a disminuir la huella hídrica en la región.

La medición de la huella hídrica no solo contribuye a la conservación del recurso hídrico para las futuras generaciones, sino que también garantiza la sostenibilidad económica de los sistemas productivos.

Arévalo *et al.* (2013) analizaron la huella hídrica del sector agrícola colombiano con el propósito de fomentar una gestión sostenible del recurso hídrico entre los principales actores: la sociedad civil, el sector privado y las entidades gubernamentales.

Fonseca *et al.* (2012) evaluaron la huella hídrica del cultivo de arroz en Perú utilizando la metodología de la Water Footprint Network (WFN) y datos obtenidos de 71 estaciones hidrometeorológicas. Encontraron que el 84% de la huella hídrica corresponde a la huella azul, el 9% a la verde y el 7% a la gris.

Rodríguez *et al.* (2009) estudiaron la huella hidrológica del sector agrícola en España, resaltando que la agricultura concentra más del 80 % del consumo hídrico nacional, principalmente debido a los cereales y cultivos industriales.

La agricultura, especialmente bajo riego, se encuentra en un proceso de transformación acelerado, enfrentando simultáneamente desafíos históricos y nuevas problemáticas emergentes. En este marco, los agricultores deben ajustarse a un entorno caracterizado por la creciente interdependencia entre producción y consumo derivada del comercio y la globalización, mientras que los avances tecnológicos amplifican la productividad y modifican con rapidez tanto los sistemas de producción como los patrones de consumo (FAO, 2013).

Por otro lado, la globalización ha intensificado el comercio agropecuario, lo que ha implicado un aumento en el flujo de agua virtual, es decir, el agua incorporada en los productos trasladados entre distintas regiones. En consecuencia, las decisiones de consumo en un país pueden repercutir directamente sobre la disponibilidad hídrica en otras regiones, subrayando así la relevancia de la huella hídrica como un indicador fundamental en los mercados agrícolas internacionales (Chapagain & Hoekstra, 2004).

La huella hídrica (HH) de los productos agropecuarios varía entre regiones, por factores como el clima y las prácticas de producción. Estas diferencias reflejan no solo las características ecológicas particulares de cada territorio, sino también el

nivel tecnológico y las políticas de gestión hídrica implementadas en cada nación (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

En conjunto, la literatura analizada muestra que la huella hídrica constituye un indicador clave para analizar la relación entre producción, consumo y uso del agua, permitiendo identificar presiones sobre el recurso hídrico y orientar estrategias hacia un manejo más eficiente y sostenible, particularmente en sectores con alta demanda hídrica como la agricultura.

Dado su carácter multifuncional, la gestión del agua implica no únicamente aspectos técnicos y económicos, sino también factores sociales, institucionales y ambientales que garantizan su utilización equitativa y eficiente. En consecuencia, diferentes organismos e instituciones subrayan la importancia de desarrollar políticas integrales que consideren las diversas dimensiones asociadas al recurso hídrico.

La huella hídrica constituye un indicador multidimensional que no solo permite cuantificar el volumen de agua consumida, sino que también diferencia entre los distintos tipos de agua (verde, azul y gris) y considera las dimensiones espaciales y temporales de su utilización, transformándose así en una herramienta valiosa para evaluar la sostenibilidad de las prácticas de gestión hídrica y detectar áreas de mejora (Aldaya et al., 2010).

El marco legal mexicano basado en la Ley de Aguas Nacionales (LAN) de 1992, establece que las actividades vinculadas con la gestión del agua deben regirse bajo un enfoque integral que armonice las necesidades sociales, económicas y ambientales. De acuerdo con la CONAGUA (2014), la política hídrica nacional ha atravesado tres etapas principales: la primera, a comienzos del siglo XX, se centró en aumentar la oferta mediante grandes obras de infraestructura; la segunda, entre 1980 y 1990, enfocó la gestión en la demanda y la descentralización, destacando la creación de la CONAGUA y la transferencia de responsabilidades a los municipios; finalmente, desde inicios del siglo XXI, la tercera etapa prioriza la sostenibilidad,

promoviendo el tratamiento y reúso de aguas residuales y una mejor administración de los recursos hídricos.

El concepto de huella hídrica ha comenzado a reflejarse en el ámbito público mexicano, tanto en las estadísticas hídricas nacionales como en diversas iniciativas promovidas por la CONAGUA para fomentar el uso eficiente del recurso. Por ejemplo, en 2016 se publicaron en el Diario Oficial de la Federación las Reglas que establecen la metodología para determinar el volumen de uso eficiente de las aguas nacionales, incorporando la evaluación de la huella hídrica como parte de sus lineamientos (Vázquez & Lambarri, 2017). De esta manera, el cálculo de la huella hídrica se posiciona como una herramienta efectiva para orientar a los tomadores de decisiones en el sector, así como a organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, permitiendo planificar estrategias, formular políticas públicas, rediseñar productos y procesos, y tomar decisiones sobre la inversión de recursos (Hoekstra et al., 2011).

En este escenario, la huella hídrica emerge como un instrumento innovador que complementa otros indicadores y facilita la toma de decisiones en los ámbitos gubernamental, empresarial, social e individual, contribuyendo a una gestión del agua dulce más eficiente, sostenible y equitativa (Vázquez & Lambarri, 2017).

La relevancia de calcular la huella hídrica se ha extendido hacia la formulación de políticas públicas y estrategias de conservación, como lo evidencian las metodologías adoptadas por organismos internacionales, incluida la Water Footprint Network (Hoekstra et al., 2011). En su informe, Vázquez & Lambarri (2017) destacan la importancia de diseñar políticas públicas integrales y coherentes no solo en el sector hídrico, sino también en los sectores ambiental, agrícola, comercial y energético. Asimismo, subrayan que la incorporación de la huella hídrica en la toma de decisiones permite desarrollar estrategias que equilibren las demandas competitivas del agua, promuevan su uso eficiente y aseguren la seguridad hídrica y alimentaria a largo plazo.

Diversos estudios han abordado el análisis del uso del agua en el sector agropecuario desde enfoques tanto físicos como económicos. En este sentido, Trujillo-Nava et al. (2023) estimaron la huella hídrica en la producción de carne bovina en México bajo un sistema intensivo, utilizando la metodología propuesta por Hoekstra. Sus resultados indican una huella hídrica de 2,972.4 litros por kilogramo de carne, destacando que la mayor proporción del consumo de agua se asocia a la producción de alimento para el ganado más que al consumo directo del animal. Asimismo, los autores señalan que este indicador puede variar significativamente dependiendo de factores como la dieta, la raza y el sistema de producción, lo que resalta la importancia de contextualizar los resultados en función de las condiciones específicas de cada sistema.

Por otra parte, Fuentes-López et al. (2026) analizaron la gestión sostenible del agua en el Bajío mediante la evaluación de la huella hídrica, los costos de producción y la productividad del agua en distintos cultivos. Los resultados muestran que existen diferencias importantes entre cultivos, donde algunos como el frijol presentan altos niveles de consumo hídrico y mayores costos, mientras que otros como zanahoria y tomate resultan más eficientes en el uso del agua y generan mayores beneficios económicos. Además, se identificó una relación inversa entre la huella hídrica y la productividad del agua, lo que evidencia la necesidad de implementar políticas que promuevan una asignación más eficiente del recurso hídrico.

En el ámbito económico, De la Cruz Flores (2022) evaluó el valor del agua en condiciones de escasez en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma mediante un modelo de programación lineal. Los resultados indican que el valor económico del agua en condiciones de sequía es considerablemente mayor que las tarifas actuales, alcanzando 2.52 \$/m³, lo que refleja una subvaloración del recurso en el sector agrícola. Asimismo, el estudio demuestra que una asignación óptima del agua puede incrementar significativamente los beneficios económicos, favoreciendo cultivos con mayor rentabilidad y menor demanda hídrica.

En conjunto, estos trabajos evidencian la importancia de integrar enfoques de huella hídrica y valoración económica para mejorar la gestión del agua en la agricultura, particularmente en contextos de escasez, donde resulta fundamental optimizar su uso y promover sistemas productivos más eficientes y sostenibles.

2.6 Literatura citada

- AgroDer. (2012). Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer.
- 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(5), 941–958.
- Allan, J. A. (1998). Virtual water: A strategic resource. Global solutions to regional deficits. *Groundwater*, 36(4), 545–546.
- Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2011). Estudio nacional de huella hídrica: Colombia, sector agrícola. *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 6, 101–126.
- 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(5), e3319. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3319>
- Cereceres Rivas, J. A. (2022). *Huella hídrica de la producción de sotol en el estado de Chihuahua, México* [Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma de Chihuahua]. <https://repositorio.uach.mx/460/1/Tesis.pdf>
- CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2024). *Recursos hídricos*. CEPAL Biblioguías. <https://biblioguias.cepal.org/c.php?g=934230&p=6736670>

- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). *Water footprints of nations* (Value of Water Research Report Series No. 16). UNESCO-IHE.
- CONAGUA. (2006). *El agua en México*. IV Foro Mundial del Agua. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
<https://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EL-AGUA-EN-MEXICO.pdf>
- CONAGUA. (2014). *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- CONAGUA. (2020) Estadísticas Agrícolas de los Distritos Temporal Tecnificado, Año agrícola 2019-2020
https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EADTT_2019_2020.pdf
- CONAGUA. (2022). *Informe sobre la situación de los recursos hídricos en México*. Gobierno de México.
- CONAGUA (2023). Comisión Nacional del Agua. Actualización de la Disponibilidad Media Anual de agua en el Acuífero Valle de San Juan del Río (2223), Estado de Querétaro.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/queretaro/DR_2203.pdf
- CONAGUA. (2024a). *Estadísticas del agua en México 2023*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
- DOF. (2020). *Ley de Aguas Nacionales*. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- Ercin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment International*, 64, 71–82.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.019>
- Falkenmark, M. (1984). *New ecological approach to the water cycle: Ticket to the future*. *AMBIO*, 13(3), 152–160.

- Falkenmark, M., & Widstrand, C. (1992). *Population and water resources: A delicate balance*. *Population Bulletin*, 47(3), 1–36. Population Reference Bureau.
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua: Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. FAO. <https://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>
- FAO. (2023). *Water scarcity means less water for agriculture production which in turn means less food available, threatening food security and nutrition*. <https://www.fao.org/newsroom/detail/water-scarcity-means-less-water-for-agriculture-production-which-in-turn-means-less-food-available-threatening-food-security-and-nutrition/es>
- 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>
- Fonseca Salazar, S. E., Verano Zelada, C., & Mariluz Silva, J. P. (2012). *Huella hídrica del arroz en el Perú*. ANA
- Garay Jácome, Á. S., Valdivia Alcalá, R., Hernández Ortiz, J., & Sandoval Romero, F. (2022). *Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(1), 103–116.
- Hoekstra, A. Y. (2003). *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade*. UNESCO-IHE. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Wiley-Blackwell.
- Hoekstra, A. Y. 2009. Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*. 68: 1963-1974.
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Routledge.

- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan.
- IICA (2015). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura. <http://www.iica.int>
- IICA. (2020). *Gestión sostenible del agua en la agricultura: Un enfoque territorial e integrado*. San José, Costa Rica.
- IICA. (2021). *Desafíos y oportunidades para la agricultura frente a la crisis del agua*. San José, Costa Rica.
- ISO. (2014). *ISO 14046:2014 Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices*. <https://www.iso.org/obp/ui>
- ISO. (2025). ODS 6: Agua limpia y saneamiento. <https://www.iso.org/sdg/SDG06.html>
- IMTA. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2018). Huella hídrica en México: análisis y perspectivas. Gobierno de México. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/huella-hidrica/
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. <https://www.ipcc.ch>
- Martínez-Austria, P. F., & Patiño-Gómez, C. (2012). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México*. Tecnología y Ciencias del Agua, III(1), 5-20.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2010). *The green, blue, and grey water footprint of farm animals and animal products* (Value of Water Research Report Series No. 48). UNESCO-IHE. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report48-WaterFootprint-AnimalProducts-Vol1.pdf>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). *National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption* (Value of Water Research Report Series No. 50). UNESCO-IHE.

- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm **animal** products. *Ecosystems*, 15(3), 401–415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- 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. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v11n5/2007-2422-tca-11-05-1.pdf>
- Rees, W. E. (1992). *Ecological footprints and appropriated carrying capacity* (Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out). *Environment and Urbanization*, 4(2), 121–130.
- 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. Universidad Nacional de Cuyo*, 47(1), 93-107.
- Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., de Silva, R., & Barker, R. (1998). *World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues* (IWMI Research Report 19). International Water Management Institute (IWMI).
- SEMARNAT. (2013). *Cuencas hidrográficas: Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*.
- SEMARNAT. (2018). *Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales*.
- SEMARNAT. (2021). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2021: Compendio de estadísticas ambientales, indicadores clave, de desempeño ambiental y de crecimiento verde. Secretaría resumen de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. <https://www.gob.mx/semarnat>
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2016). *La huella hídrica: El agua que usamos*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.

<https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/articulos/la-huella-hidrica-el-agua-que-usamos>

- Trujillo-Nava, A., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., & López-Santiago, M. A. (2023). Estimation of the water footprint in the production of beef from European cattle in Mexico. *Agro Productividad*, 16(8), 93–98. <https://doi.org/10.32854/agrop.v16i7.2453>
- Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (Eds.). (2017). *Huella hídrica en México: Análisis y perspectivas*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. UNESCO.

3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ GRANO EN EL DISTRITO DE RIEGO 023 DE SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO¹.

Gómez – Garcilazo, Joanna J.¹; Valdivia-Alcalá, Ramón.^{1*}; Garay - Jácome Ángeles S.¹ ; Hernández-Ortíz, Juan.¹; Gallegos - David Alberto¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera Federal México-Texcoco, Texcoco, Estado De México, México. C.P. 56230.

*Autor para correspondencia: ramvaldi@gmail.com

3.1 Resumen

El agua es un recurso esencial para el desarrollo económico y la seguridad alimentaria, por lo que su uso eficiente en la agricultura resulta clave para la sostenibilidad. En este contexto, la huella hídrica se ha consolidado como un indicador integral para evaluar el consumo de agua y los impactos asociados a la producción agrícola. El objetivo de este estudio fue estimar la huella hídrica verde, azul y gris del cultivo de maíz grano durante el ciclo primavera-verano en el Distrito de Riego 023, San Juan del Río, Querétaro, México. Se aplicó la metodología de la Water Footprint Network, utilizando información del periodo 2000–2023. Los requerimientos hídricos se calcularon mediante los programas CROPWAT 8.0 y CLIMWAT 2.0, considerando variables climáticas, agronómicas y de manejo. Asimismo, se emplearon datos oficiales de producción y superficie sembrada. Los resultados muestran que la huella hídrica total del maíz osciló entre 1,154 y 1,972 L/kg, con un promedio cercano a 1,400 L/kg. La componente predominante fue la huella hídrica azul, lo que indica alta dependencia del riego y presión sobre los recursos hídricos. La huella verde presentó valores menores y relativamente estables, asociados a la precipitación, mientras que la huella gris reflejó el impacto del uso de fertilizantes. En general, se observó una tendencia a la disminución de la huella hídrica en años recientes, vinculada a mejoras en el rendimiento y eficiencia del agua. No obstante, la alta participación de la huella azul evidencia la

¹ Artículo enviado a: Revista Agro Productividad

necesidad de estrategias que reduzcan la dependencia del riego y promuevan un uso más sostenible del agua.

Palabras clave: Huella hídrica; Maíz grano; Gestión sustentable del agua; Agricultura de temporal; Distrito de Riego 023; México, Querétaro.

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE WATER FOOTPRINT IN THE PRODUCTION OF GRAIN MAIZE IN IRRIGATION DISTRICT 023 OF SAN JUAN DEL RÍO, QUERÉTARO

Water is an essential resource for economic development and food security; therefore, its efficient use in agriculture is key to sustainability. In this context, the water footprint has become a comprehensive indicator for assessing water consumption and the impacts associated with agricultural production. The objective of this study was to estimate the green, blue, and grey water footprint of grain maize during the spring–summer growing cycle in Irrigation District 023, San Juan del Río, Querétaro, Mexico. The methodology proposed by the Water Footprint Network was applied, using data from the 2000–2023 period. Crop water requirements were estimated using the CROPWAT 8.0 and CLIMWAT 2.0 models, considering climatic, agronomic, and crop management variables. In addition, official data on production and cultivated area were used. The results show that the total water footprint of maize ranged from 1,154 to 1,972 L/kg, with an average of approximately 1,400 L/kg. The dominant component was the blue water footprint, indicating a high dependence on irrigation and significant pressure on water resources. The green water footprint showed lower and relatively stable values, associated with precipitation variability, while the grey water footprint reflected the environmental impact of fertilizer use. Overall, a decreasing trend in the total water footprint was observed in recent years, mainly linked to improvements in crop yield and water use efficiency. However, the high contribution of the blue water footprint highlights the need to implement management strategies aimed at reducing irrigation dependence and promoting more sustainable water use.

Keywords: Water footprint; Grain maize; Sustainable water management; Rainfed agriculture; Irrigation District 023; Mexico, Querétaro.

3.2 Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida, el desarrollo económico y la estabilidad de los sistemas productivos, particularmente en el sector agrícola, donde constituye el principal insumo para la producción de alimentos. A nivel global, la creciente demanda de agua, impulsada por el aumento poblacional, la intensificación de las actividades productivas y los efectos del cambio climático ha generado una presión significativa sobre los recursos hídricos, lo que plantea importantes desafíos para su gestión sostenible (FAO, 2023; ONU, 2023). En este contexto, la agricultura destaca como el mayor consumidor de agua dulce, representando aproximadamente el 70 % de las extracciones a nivel mundial y cerca del 76–92 % en países como México (CONAGUA, 2023; SIAP, 2016).

En México, la disponibilidad de agua presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, con regiones que enfrentan condiciones de escasez hídrica, particularmente en zonas áridas y semiáridas. Esta situación se ve agravada por la sobreexplotación de acuíferos, la baja eficiencia en los sistemas de riego y la limitada implementación de tecnologías de manejo sustentable, lo que incrementa la vulnerabilidad del sector agrícola ante escenarios de estrés hídrico (SEMARNAT, 2021). El uso ineficiente del agua en la agricultura no solo compromete la sostenibilidad del recurso, sino que también afecta la productividad y la seguridad alimentaria a largo plazo.

Ante este panorama, surge la necesidad de contar con herramientas que permitan evaluar de manera integral el uso del agua y sus impactos asociados. La huella hídrica, propuesta por Hoekstra (2003), se ha consolidado como un indicador que cuantifica el volumen total de agua utilizado directa e indirectamente en la producción de bienes y servicios, incorporando dimensiones tanto cuantitativas

como cualitativas del recurso. Este enfoque distingue tres componentes: la huella hídrica verde, asociada al agua de lluvia almacenada en el suelo; la huella hídrica azul, relacionada con el uso de aguas superficiales y subterráneas para riego; y la huella hídrica gris, que representa el volumen de agua necesario para diluir contaminantes generados durante el proceso productivo (Hoekstra et al., 2011).

Diversos estudios han demostrado que la huella hídrica en sistemas agrícolas depende en gran medida de factores como las condiciones climáticas, el tipo de cultivo, las prácticas de manejo y la eficiencia en el uso del agua. En particular, en sistemas bajo riego, la huella hídrica azul suele ser predominante, lo que refleja una mayor presión sobre los recursos hídricos disponibles (Mekonnen & Hoekstra, 2012). En México, investigaciones recientes han evidenciado que cultivos estratégicos como el maíz presentan una alta variabilidad en su huella hídrica, influenciada por diferencias regionales en disponibilidad de agua, tecnología de riego y productividad (Botello-Aguillón et al., 2024).

El maíz es uno de los cultivos más importantes en México, tanto por su valor económico como por su relevancia en la seguridad alimentaria. Sin embargo, su producción enfrenta importantes retos asociados al uso eficiente del agua, especialmente en regiones donde la disponibilidad hídrica es limitada. En el caso del Distrito de Riego 023, ubicado en San Juan del Río, Querétaro, se ha identificado una creciente presión sobre los recursos hídricos, particularmente en el acuífero Valle de San Juan del Río, el cual presenta condiciones de sobreexplotación debido a que las extracciones superan la recarga natural (CONAGUA, 2023). Esta problemática resalta la importancia de analizar el uso del agua en los sistemas agrícolas de la región.

Si bien la huella hídrica constituye una herramienta útil para evaluar el consumo de agua, es importante reconocer que presenta ciertas limitaciones, como la falta de consideración de aspectos económicos, institucionales y de infraestructura hidráulica, así como la incertidumbre asociada al uso de datos secundarios y supuestos metodológicos (Vanham y Bidoglio, 2013). No obstante, su aplicación

permite generar información valiosa para la toma de decisiones orientadas a mejorar la eficiencia hídrica y reducir los impactos ambientales en la agricultura.

El presente estudio tiene como objetivo estimar la huella hídrica del cultivo de maíz grano en el Distrito de Riego 023 de San Juan del Río, Querétaro, durante el periodo 2000–2023, con el fin de analizar el comportamiento de sus componentes (verde, azul y gris) y contribuir al diseño de estrategias que promuevan un uso más eficiente y sostenible del recurso hídrico en sistemas agrícolas.

3.3 Materiales y métodos

El desarrollo del estudio se basa en la aplicación de la metodología para la determinación de la huella hídrica de productos agrícolas de Hoekstra et al. (2011).

El análisis se concentra en la estimación de la HH del cultivo de maíz grano, el cual es del ciclo primavera-verano en el distrito de riego 023 (DR 023) San Juan del Río, Querétaro, en el periodo 2000 a 2023.

Los datos sobre las estadísticas agrícolas fueron obtenidos de CONAGUA (2023), mientras que la información climatológica que se utilizó se obtuvo de CLIMWAT 2.0, los datos climatológicos que requiere el programa son los siguientes: a) información básica de la estación meteorológica: nombre del país, nombre de la estación, altitud, latitud y longitud; y b) datos climáticos mensuales de: precipitación (p), temperatura máxima, mínima y media, humedad relativa, insolación (horas brillo sol) y velocidad del viento.

CROPWAT 8.0 es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones desarrollada por la División de Desarrollo de Tierras y Aguas de la FAO. Es un programa informático que calcula las necesidades hídricas y de riego de los cultivos basándose en datos edafológicos, climáticos y del cultivo.

Además, permite desarrollar programas de riego para diferentes condiciones de gestión y calcular el suministro de agua del sistema para patrones de cultivo variables. CROPWAT 8.0 también permite evaluar las prácticas de riego de los

agricultores y estimar el rendimiento de los cultivos tanto en condiciones de secano como de riego.

Todos los procedimientos de cálculo utilizados en CROPWAT 8.0 se basan en las dos publicaciones de la FAO de la Serie de Riego y Drenaje, la número 56 y número. 33.

Para el cálculo de la HH gris se utilizó el paquete tecnológico de FIRA para determinar las concentraciones de los fertilizantes. La información climatológica que se obtuvo de la estación climatológica 42 Querétaro, con altitud de 1813 m, longitud 100.38 y latitud 20.6.

Se ingresa la fecha de siembra y calcula: el coeficiente de cultivo (K_c), la evapotranspiración del cultivo (ET_c), la precipitación efectiva requerimiento de riego, todos a nivel decadal (agrupación de diez días) durante todo el ciclo del cultivo, este cálculo el programa lo realiza por medio de interpolaciones para transformar los datos mensuales a decadales.

La Huella Hídrica (HH) en agricultura se define como “la suma de la Huella Hídrica Verde (HH_v) y la Huella Hídrica Azul (HH_a)” (ec. 1) (Mekonnen & Hoekstra, 2011). La HH_v se refiere al consumo de agua almacenada en la zona de raíces resultado de las precipitaciones (ec. 2) y la HH_a se refiere al consumo de aguas superficiales y/o subterráneas procedentes de la aplicación del riego (ec. 3).

$$HH = HH_a + HH_v + HH_g \quad (\text{ec. 1})$$

$$HH_v = \frac{10 * \sum_{i=1}^t ET_v}{R} = \frac{CWU_v}{R} \quad (\text{ec. 2})$$

$$HH_a = \frac{10 * \sum_{i=1}^t ET_a}{R} = \frac{CWU_a}{R} \quad (\text{ec. 3})$$

Donde, 10 es un factor de conversión de unidades de la lámina en mm a $m^3 \text{ ha}^{-1}$, R es el rendimiento del cultivo ($t \text{ ha}^{-1}$), ET_v es la evapotranspiración del agua verde (mm), CWU_v es consumo del agua verde (m^3); ET_a la evapotranspiración de agua azul (mm) y CWU_a es el consumo de agua azul (m^3); CWU_v y CWU_a se calculan

teniendo en cuenta evapotranspiración diaria (ET , mm día^{-1}) acumulada durante el período de crecimiento del cultivo, desde la siembra hasta la cosecha del cultivo.

Por otro lado, la HH gris es el volumen de agua dulce que se necesita para asimilar la carga de contaminantes usado en las concentraciones en condiciones naturales y en las normas o legislación de calidad ambiental del agua existente, se mide en volumen/tiempo.

Se determina de la siguiente manera:

$$HH_{Proc, gris} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad (\text{ec. 4})$$

L = carga de contaminantes

C_{max} = concentración máxima de contaminantes permitida

C_{nat} = Concentración natural en el agua receptora

$$L = \alpha * Apl \quad (\text{ec. 5})$$

Donde:

α = Factor adimensional que presenta la fracción de lixiviación superficial, definida como la fracción de las sustancias químicas que alcanzan las masas de agua dulce.

Para la presente investigación se utilizó el valor que sugiere Mekonnen y Hokestra (2010) de 0.1 (10%) como valor estándar cuando no hay mediciones locales para nitrógeno (N), pero también se utilizó para fósforo (P).

Apl = es la cantidad de sustancia química que se incorpora en el suelo (kg)

Para fines del presente trabajo se usaron los datos publicados por FIRA referente al paquete tecnológico para la producción de maíz grano.

Se sustituye L en la ecuación, tenemos que:

$$HH_{Prod, gris} = \frac{(\alpha * Apl) / (C_{m\acute{a}x} - C_{nat})}{Rendimiento} \quad (\text{ec. 6})$$

3.4 Resultados y Discusión

Los valores obtenidos de huella hídrica azul reflejan una fuerte dependencia entre la lámina de riego aplicada y el rendimiento del cultivo. Se observa que, en años con mayores dotaciones de agua y menores rendimientos, la huella hídrica se incrementa significativamente, lo cual indica un uso menos eficiente del recurso hídrico. Por el contrario, en años donde se presentan mayores rendimientos con menores volúmenes de riego, la huella hídrica azul tiende a disminuir, evidenciando una mejora en la eficiencia del uso del agua.

Esta tendencia sugiere que la variabilidad de la huella hídrica azul no solo está determinada por la disponibilidad de agua, sino también por la eficiencia productiva del sistema agrícola. La tendencia observada hacia valores menores en años recientes puede atribuirse a mejoras en prácticas de manejo, adopción de tecnologías agrícolas y optimización en el uso del riego.

La huella hídrica azul se estimó con base en la metodología propuesta por Hoekstra (2003, 2011), utilizando la lámina bruta de riego como aproximación del consumo de agua azul. Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura para sistemas agrícolas bajo riego, donde este componente suele ser dominante debido a la alta dependencia de fuentes superficiales y subterráneas.

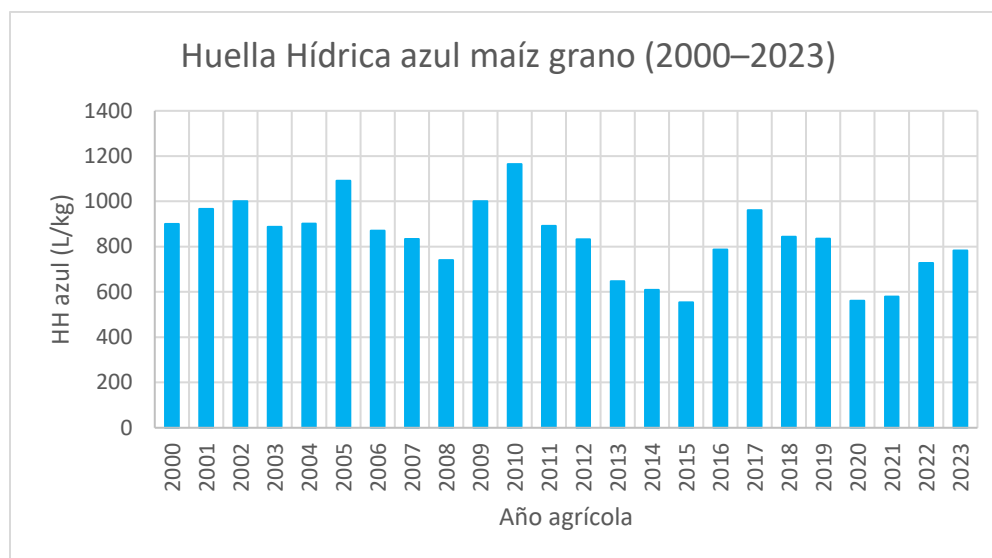


FIGURA 7: VARIACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA AZUL DEL MAÍZ GRANO (2000–2023).

La huella hídrica verde se estimó a partir de la precipitación efectiva, considerando el volumen de agua proveniente de la lluvia disponible para el cultivo. Este indicador mostró una tendencia general decreciente a lo largo del periodo analizado, pasando de valores superiores a 400 L/kg en los primeros años a valores cercanos a 270 – 300 L/kg en años recientes.

Esta disminución se asocia principalmente a incrementos en el rendimiento del cultivo, lo que implica una mayor eficiencia en el aprovechamiento del agua de lluvia. A diferencia de la huella hídrica azul, la componente verde presenta menor variabilidad, ya que depende en gran medida de las condiciones climáticas y de la distribución de la precipitación durante el ciclo agrícola.

No obstante, se observa que, en años con mayor precipitación, la huella hídrica verde tiende a incrementarse, lo que evidencia la influencia directa de las condiciones climáticas sobre este componente. Este comportamiento confirma la importancia del agua de lluvia como fuente complementaria en sistemas agrícolas bajo riego.

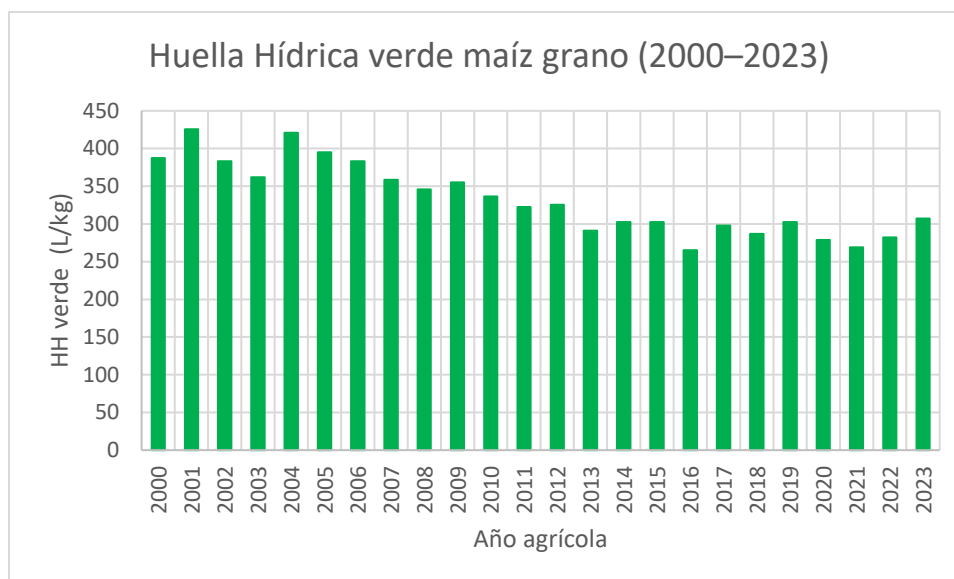


FIGURA 8: VARIACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA VERDE DEL MAÍZ GRANO (2000–2023).

La huella hídrica gris presentó una variabilidad considerable a lo largo del periodo de estudio, lo cual se encuentra estrechamente relacionado con el uso de fertilizantes y la carga de contaminantes generada en el sistema agrícola.

En algunos años, este componente alcanzó valores elevados, lo que indica un mayor volumen de agua requerido para diluir los contaminantes hasta niveles permisibles.

Este comportamiento refleja la influencia de las prácticas de manejo agrícola, particularmente en el uso de insumos químicos, sobre el impacto ambiental del sistema productivo. A diferencia de las componentes azul y verde, la huella hídrica gris no depende directamente de factores climáticos, sino de decisiones de manejo relacionadas con la fertilización y la eficiencia en la aplicación de agroquímicos.

Los resultados evidencian la necesidad de implementar prácticas de manejo más eficientes, como la fertilización de precisión, con el fin de reducir la carga contaminante y, por ende, la huella hídrica gris.

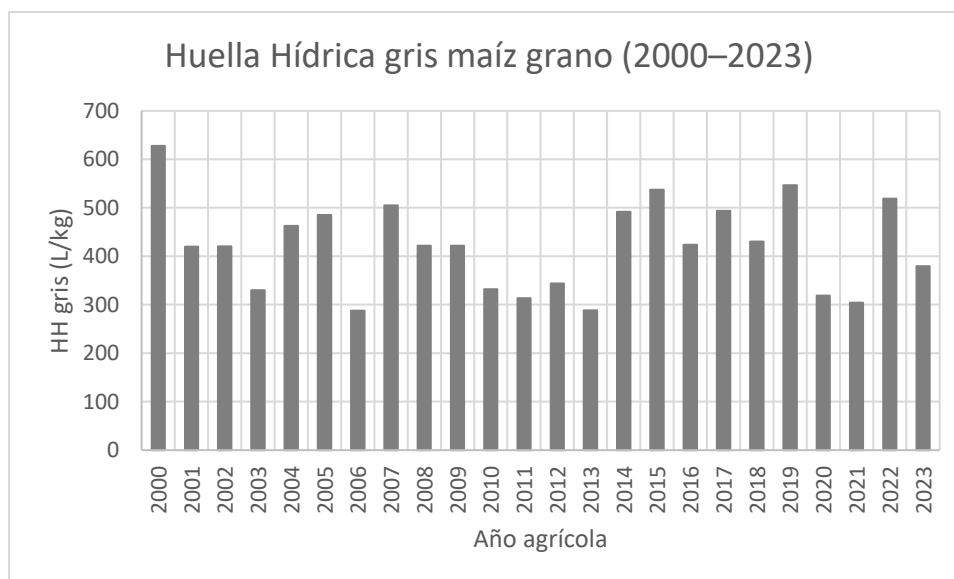


FIGURA 9: VARIACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA GRIS DEL MAÍZ GRANO (2000–2023).

La huella hídrica total del maíz grano mostró valores entre 1,154 y 1,972 L/kg durante el periodo analizado, con una tendencia general hacia la disminución en años recientes. Esta reducción se asocia principalmente a mejoras en los rendimientos del cultivo, lo que permite disminuir el volumen de agua utilizado por unidad de producto.

La variabilidad observada en la huella hídrica total responde a la interacción de sus tres componentes (azul, verde y gris), siendo la componente azul la de mayor peso en la mayoría de los años. Esto evidencia que el sistema productivo depende en gran medida del riego, lo cual representa una presión significativa sobre los recursos hídricos disponibles en la región.

La tendencia decreciente observada sugiere una mejora en la eficiencia hídrica del sistema, posiblemente asociada a la adopción de mejores prácticas agrícolas y a un uso más eficiente del agua.

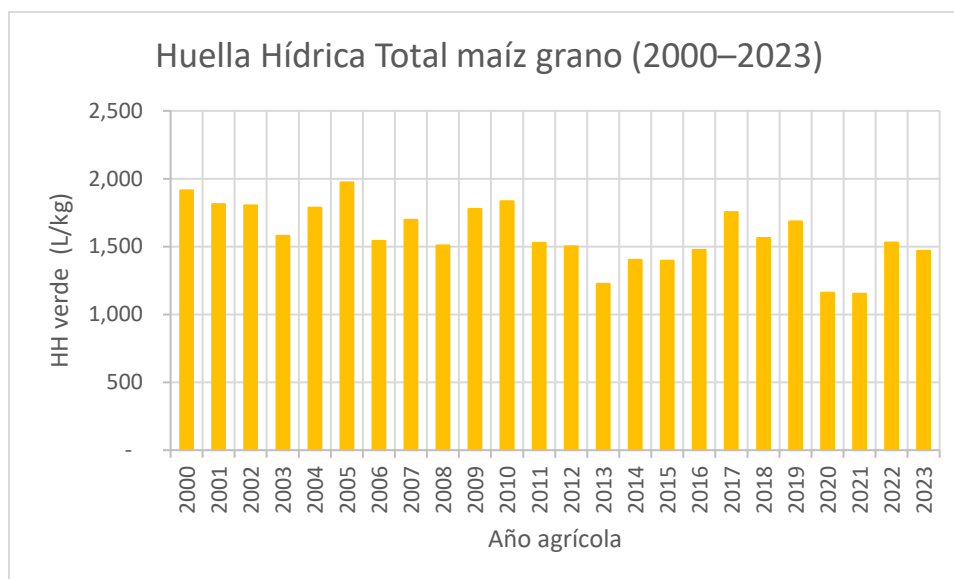


FIGURA 10: FIGURA 4. HUELLA HÍDRICA TOTAL DEL MAÍZ GRANO (2000–2023).

La comparación de los distintos componentes de la huella hídrica permite identificar claramente la predominancia de la huella hídrica azul a lo largo de todo el periodo de estudio. Este comportamiento confirma la alta dependencia del riego en la producción de maíz grano en el Distrito de Riego 023, lo cual es consistente con las condiciones semiáridas de la región.

Por su parte, la huella hídrica verde presenta valores menores, reflejando la contribución limitada de la precipitación al suministro hídrico del cultivo. La huella hídrica gris, aunque de menor magnitud en comparación con la azul, muestra una contribución relevante, evidenciando el impacto ambiental asociado al uso de fertilizantes.

En conjunto, el análisis comparativo permite identificar áreas de oportunidad para mejorar la sostenibilidad del sistema agrícola, particularmente mediante la reducción del consumo de agua de riego y la optimización en el uso de insumos agrícolas.

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que la huella hídrica del maíz grano en el Distrito de Riego 023 se encuentra dominada por la componente

azul, con valores que oscilan entre 700 y más de 1,000 L/kg, alcanzando máximos cercanos a 1,165 L/kg. En términos globales, la huella hídrica total varió entre 1,154 y 1,972 L/kg, con un promedio aproximado de 1,400 L/kg, mostrando además una tendencia decreciente en años recientes asociada a mejoras en el rendimiento del cultivo.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Botello-Aguillón et al. (2024), quienes estimaron la huella hídrica agrícola en el Distrito de Riego 011 Alto Río Lerma, obteniendo valores de huella hídrica total en un rango aproximado de 1,200 a 2,000 L/kg. En dicho estudio, la componente azul representó más del 60 % del total, lo cual coincide directamente con los resultados del presente trabajo, donde también se observa una alta dependencia del riego como principal fuente de abastecimiento hídrico.

En relación con la huella hídrica verde, en esta investigación se identificó una disminución de valores superiores a 400 L/kg a rangos cercanos a 270–300 L/kg en años recientes, lo que indica una mejora en la eficiencia del aprovechamiento del agua de lluvia. Este comportamiento es comparable con lo señalado por Botello-Aguillón et al. (2024), quienes reportan que la huella hídrica verde suele representar entre el 20 % y el 35 % del total en sistemas bajo riego, dependiendo de la variabilidad en la precipitación.

Por su parte, la huella hídrica gris en el presente estudio alcanzó valores superiores a 500 L/kg en algunos años, lo que refleja un impacto ambiental significativo asociado al uso de fertilizantes. Resultados similares fueron reportados por Garay-Jácome et al. (2022), quienes analizaron la huella hídrica de la caña de azúcar en la cuenca del Papaloapan, encontrando que la componente gris puede representar entre el 20 % y el 30 % de la huella hídrica total. En ambos casos, los valores elevados se asocian con el uso intensivo de nutrientes, particularmente nitrógeno.

Adicionalmente, Fuentes-López et al. (2026) documentaron que en la región del Bajío la sobreexplotación de acuíferos y la alta demanda agrícola han incrementado la presión sobre los recursos hídricos, destacando una fuerte dependencia del agua

subterránea en distritos de riego. Este contexto coincide con los resultados obtenidos en el Distrito de Riego 023, donde la predominancia de la huella hídrica azul evidencia una dependencia estructural del riego y una mayor vulnerabilidad ante escenarios de escasez hídrica.

Un hallazgo relevante del presente estudio es la relación inversa entre la huella hídrica y el rendimiento del cultivo, donde a mayores rendimientos se observa una reducción en la huella hídrica total. Este comportamiento coincide con lo reportado por Botello-Aguillón et al. (2024), quienes señalan que la eficiencia en el uso del agua está estrechamente vinculada con la productividad agrícola. No obstante, este incremento en la productividad puede implicar un mayor uso de fertilizantes, lo que incrementa la huella hídrica gris, evidenciando un posible trade-off entre eficiencia productiva y sostenibilidad ambiental.

En comparación con otros sistemas productivos, Trujillo-Nava et al. (2023) estimaron la huella hídrica en la producción de carne de bovino en México en 2,972.4 L/kg, valor significativamente superior al observado en el presente estudio para el cultivo de maíz (1,154–1,972 L/kg). Esta diferencia se explica por el mayor consumo indirecto de agua en sistemas pecuarios, lo que confirma que los productos de origen animal presentan una mayor presión hídrica.

En conjunto, la evidencia comparativa indica que los valores obtenidos en el Distrito de Riego 023 se encuentran dentro de los rangos reportados en estudios nacionales, lo que valida la consistencia metodológica del presente trabajo. Sin embargo, la elevada participación de la huella hídrica azul revela que la sostenibilidad del sistema agrícola depende no solo de la eficiencia productiva, sino también de una gestión integral del recurso hídrico que reduzca la dependencia del riego y minimice los impactos ambientales asociados.

Finalmente, aunque se observan avances en la eficiencia del uso del agua, la persistente predominancia de la huella hídrica azul indica la existencia de desafíos estructurales en la gestión del recurso. Futuras investigaciones deberían incorporar información a nivel de parcela que permita mejorar la precisión de las estimaciones,

particularmente en la componente gris, y fortalecer la toma de decisiones en materia de sostenibilidad hídrica.

3.5 Conclusiones

La estimación de la huella hídrica del cultivo de maíz grano en el Distrito de Riego 023 permitió dimensionar de manera integral el uso del recurso hídrico en la producción agrícola de la región. Los resultados evidencian que el sistema productivo presenta una alta dependencia del agua de riego, reflejada en la predominancia de la huella hídrica azul, lo que implica una presión significativa sobre las fuentes superficiales y subterráneas.

La limitada contribución de la huella hídrica verde es limitada debido a las condiciones climáticas semiáridas de la región. La precipitación media anual, cercana a 570 mm, no es suficiente para satisfacer completamente los requerimientos hídricos del cultivo de maíz, lo que explica la predominancia de la huella hídrica azul. Aquí la importancia de implementar estrategias que mejoren el aprovechamiento del agua de lluvia, como prácticas de conservación de humedad en el suelo.

Asimismo, la presencia de la huella hídrica gris evidencia la importancia de fortalecer prácticas agrícolas más sostenibles que reduzcan los impactos sobre la calidad del agua. Aunque se identificó una tendencia hacia la reducción de la huella hídrica total en años recientes, asociada a mejoras en la productividad del cultivo, esta disminución no elimina la problemática estructural relacionada con la sobreexplotación de los recursos hídricos en la región.

Por lo tanto, el incremento en la eficiencia productiva debe ir acompañado de estrategias de gestión integral del agua.

Se recomienda promover la tecnificación de los sistemas de riego, la implementación de prácticas de agricultura sostenible, el uso eficiente de insumos y el fortalecimiento de políticas públicas orientadas a la gestión racional del agua.

Resulta fundamental fomentar la participación de los productores en esquemas de manejo eficiente del recurso hídrico.

La huella hídrica proporciona información relevante que puede contribuir a la toma de decisiones, para la planificación territorial y diseño de estrategias que garanticen la seguridad hídrica en el largo plazo.

3.6 Literatura citada.

Allan, J.A. (1998). Virtual water: a strategic resource, global solutions to regional deficits. *Ground Water* 1998, 36, 545–546.

Botello-Aguillón, C., Alcalá, R. V., Sangerman-Jarquín, D. M., Ortiz, J. H., García, F. G. G., & Romero, F. S. (2024). Estimation of the agricultural water footprint of DR 011, upper Lerma River. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6). <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3319>

Cervantes R., Sánchez S., Montano G. (2020) Problemáticas so-cio-ambientales en torno al agua utilizada para actividades agrícolas en cinco municipios del estado de Chihuahua, México: *Sociedad y Ambiente*, ISSN: 2007-6576, pp. 124-151. <https://doi.org/10.31840/sya.vi22.2087>

Chapagain, A. K. y A. Y. Hoekstra. Water footprints of nations. *Value of Water. Research Report Series No. 16*. UNESCO-IHE. Delft. The Netherlands. 2004. Disponible en: www.waterfootprint.org

(CONAGUA). (2025). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego. <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego>

Edafología. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#mapa>

Estadísticas agrícolas de los distritos de riego <https://www.gob.mx/conagua/documentos/estadisticas-agricolas-de-los-distritos-de-riego> consultado el 21 de nov de 2025.

FAO. Tierras y aguas. <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/es/>

FAO. 2006. Evapotranspiración del cultivo, guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Serie de Riego y Drenaje FAO No. 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. 322 p.

Fuentes-López, F. D., Hernández-Ortíz, J., Valdivia-Alcalá, R., & Ga-ray-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 Jacome, Á. S., Valdivia Alcalá, R., Hernández Ortiz, J., & Sandoval Romero, F. (2022). Estimación de la huella hídrica de la producción de caña de azúcar para los ingenios de la cuenca del Papaloapan. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 13(1), 103-113. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i1.2581>

Hoekstra, A. Y. 2008. Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints. Value of Water Research Report Series No 28, UNESCOIHE, Delft, Netherlands. Disponible en: <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report28-WaterNeutral.pdf/>

Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water trade (Value of Water Research Report Series No. 12). UNESCO-IHE.

Hoekstra, A. Y. (2008). Water neutral: Reducing and offsetting the impacts of water footprints (Value of Water Research Report Series No. 28). UNESCO-IHE.

Hoekstra, A. Y. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics*, 68(7), 1963–1974. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.016>

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

INEGI. Edafología. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/#mapas>

ISO 14046:2014 Environmental management -- Water footprint -- Principles, requirements and guidelines.

ISO/TR 14073:2016 Environmental management -- Water footprint -- Illustrative examples on how to apply ISO 14046.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415.
<https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>

Rees, W.E. (1992). Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization* 4 (2), 121–130.

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. Universidad Nacional de Cuyo*, 47(1), 93-107.

SEMARNAT. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México 2005. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 2005.

Trujillo-Nava, A., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., & López-Santiago, M. A. (2023). Estimation of the water footprint in the production of beef from European cattle in Mexico. *Agro Productividad*, 16(8), 93–98.
<https://doi.org/10.32854/agrop.v16i7.2453>

Vázquez del Mercado, R., & Lambarri, J. (2017). Huella hídrica en México: análisis y perspectivas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México. 255 pp