

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 CARNE BOVINA EN EL MUNICIPIO DE
GUERRERO, CHIHUAHUA”**

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

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

Presenta:

Nayeli Sosa Márquez

Bajo la supervisión de:

Dr. Ramón Valdivia Alcalá

Chapingo, Estado de México, noviembre de 2025



**"ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE CARNE
BOVINA EN EL MUNICIPIO DE GUERRERO, CHIHUAHUA"**

Tesis realizada por Nayeli Sosa Márquez, bajo la supervisión del Comité Asesor
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



DR. CÉSAR BOTELLO AGUILLÓN

ASESOR



DRA. ANDREA TRUJILLO NAVA

ASESOR



M.C. JOSÉ MARÍA CONTRERAS CASTILLO

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1 Planteamiento del problema.	3
1.2 Objetivos de la investigación.....	5
1.2.1 Objetivo general.	5
1.2.2 Objetivos específicos.	5
1.3 Hipótesis de la investigación.....	5
1.3.1 Hipótesis general.	5
1.3.2 Hipótesis específicas.....	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Estructura del documento.....	7
1.6 Literatura citada.....	9
2. REVISIÓN DE LITERATURA	11
2.1 Aspectos generales del recurso hídrico	11
2.1.1 Distribución y estructura hidrológica en México	12
2.1.2 Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH).....	21
2.1.3 Escasez de agua y estrés hídrico	25
2.1.4 Agua renovable en México	28
2.1.5 Tarifas del agua en México	29
2.1.6 Economía del agua y costos de suministro de agua	32
2.2 Huella Hídrica.....	34
2.2.1 Huella hídrica del sector agrícola y pecuario	39
2.2.2 Huella hídrica y políticas públicas	45
2.2.3 Huella hídrica y valoración económica del agua	48
2.2.4 Huella hídrica y valoración económica del agua	54
2.3 Literatura citada.....	55

3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE CARNE DE GANADO BOVINO EN EL MUNICIPIO DE GUERRERO, CHIHUAHUA.	64
3.1 Resumen	64
3.2 Introducción	65
3.3 Materiales y métodos	68
3.4 Resultados y Discusión	71
3.5 Conclusiones	76
3.6 Literatura citada	77
4. CONCLUSIONES GENERALES	82
5. LITERATURA CITADA	83

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Definiciones convencionales de niveles de estrés hídrico	27
Cuadro 2. Consumo de agua del ganado bovino en engorda	72
Cuadro 3. Peso promedio, ganancia de peso y consumo alimenticio por etapa	73
Cuadro 4. Consumo total por periodo	74
Cuadro 5. Volumen de agua utilizado en la producción de los cultivos consumidos en la dieta del ganado.....	74
Cuadro 6. Huella hídrica azul y verde en la producción de ganado bovino de la raza Salers	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del documento de tesis	8
Figura 2. Regiones hidrológicas.....	12
Figura 3. Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHA) y Acuíferos	13
Figura 4. Ubicación del municipio de Guerrero, Chihuahua	14
Figura 5. Hidrografía y relieve del municipio de Guerrero, Chihuahua	15
Figura 6. Localización del acuífero Guerrero–Yepómera	16
Figura 7. Ríos principales de México	17
Figura 8. Volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2022 (miles de hm ³).....	18
Figura 9. Acuíferos sobreexplotados en 2021 y 2022	19
Figura 10. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres, 2021 y 2022	21
Figura 11. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo	29
Figura 12. Tarifas domésticas mínimas por entidad federativa en 2023	31
Figura 13. Cuatro fases diferentes de la evaluación de la huella hídrica.....	38
Figura 14. Municipio de Guerrero, Chihuahua	68

SIGLAS Y ABREVIATURAS

ACV. Análisis del Ciclo de Vida

CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CONAGUA. Comisión Nacional del Agua

DOF. Diario Oficial de la Federación

DR. Distrito de Riego

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

GIRH. Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

HH. Huella Hídrica

IICA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura

IMCO. Instituto Mexicano para la Competitividad

INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

IPCC. Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático

ISO. Organización Internacional de Normalización

IWMI. Instituto Internacional de Manejo del Agua

JMAS. Junta Municipal de Agua y Saneamiento

NOM. Norma Oficial Mexicana

ODS. Objetivos de Desarrollo Sostenible

OCDE. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos

ONU. Organización de las Naciones Unidas

PIB. Producto Interno Bruto

RH. Regiones Hidrológicas

RHA. Región Hidrológico-Administrativa

SADER. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural

SECIHTI. Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

SEDEMA. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México

SEMARNAT. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera

SMN. Servicio Meteorológico Nacional

UNESCO. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura

UNESCO-IHE. Instituto para la Educación del Agua de la UNESCO

WFN. Water Footprint Network

WWAP. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos

WWF. Fondo Mundial para la Naturaleza

DEDICATORIAS

A mis padres, Olivia y Carlos, por su amor incondicional, por ser mi mayor motivación y por enseñarme con su ejemplo la importancia del esfuerzo, la fe y la perseverancia. Gracias por confiar siempre en mí, por cada palabra de aliento, por su apoyo constante en cada etapa de mi vida y por estar presentes aun cuando la distancia nos separa. Todo lo que soy y todo lo que he logrado se los debo a ustedes.

A mis hermanas, Estely y Kimy, por su amor, por las risas compartidas, las conversaciones interminables y por ser mi refugio y alegría. Gracias por acompañarme siempre, por hacer más ligeros los días difíciles y por recordarme, con su cariño, que la vida es más bella cuando se comparte. Son el regalo más hermoso que la vida me ha dado y mi mayor fuente de inspiración.

A mi papá Lel, por su cariño, por sus palabras de aliento y por esa maravillosa forma de enseñarnos a amar el campo y valorar el trabajo de la tierra. Gracias por estar en cada logro, por creer en mí y por sembrar en mí el amor por lo que hago.

A mis queridos amigos María Laura, Alberto y Ernesto, por su amistad sincera y por cada momento compartido. Gracias por las risas, los abrazos, el apoyo y la compañía incondicional. Su presencia ha hecho este camino más ameno, más cálido y mucho más feliz.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo, mi alma mater, por ofrecerme una educación de calidad y por ser una institución tan noble que me ha brindado la oportunidad de alcanzar mis sueños profesionales. Gracias por los conocimientos adquiridos, por las experiencias compartidas y por los amigos que se han convertido en mi segunda familia, quienes hicieron de mi paso por esta casa de estudios una etapa inolvidable.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), por su apoyo económico durante los 24 meses de mi posgrado. Este respaldo fue fundamental para la culminación de mis estudios, permitiéndome concentrarme plenamente en la investigación y en mi formación académica.

A la División de Ciencias Económico-Administrativas, por brindarme la oportunidad de recibir una educación integral y de calidad, por las enseñanzas que han contribuido a mi desarrollo personal y profesional, así como por las experiencias que fortalecieron mi formación y ampliaron mi visión académica y práctica.

A mi director de tesis, Dr. Ramón Valdivia Alcalá, por su tiempo, compromiso y disposición para guiarme a lo largo de esta investigación. Gracias por sus explicaciones claras, sus valiosos conocimientos, sus recomendaciones constructivas. Su apoyo constante y su orientación experta fueron fundamentales para realizar esta investigación.

A mi Comité Asesor, por su dedicación, paciencia y generosidad al compartir sus conocimientos. Gracias por sus recomendaciones, observaciones y acompañamiento durante todo el proceso de investigación, por sus sugerencias precisas y oportunas, y por transmitirme enseñanzas que enriquecieron profundamente esta investigación y mi formación académica.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre	Nayeli Sosa Márquez
Fecha de nacimiento:	01 de marzo del 2000
Lugar de Nacimiento:	Guerrero, Chihuahua
CURP:	SOMN000301MCHSRYA0
Profesión:	Ingeniera en Economía Agrícola
Cédula profesional:	14695385

Desarrollo académico

Bachillerato:	Escuela Preparatoria María Comadurán Chávez Generación 2015 – 2018
Licenciatura:	Universidad Autónoma Chapingo Generación 2019 – 2023

RESUMEN GENERAL

ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE CARNE DE GANADO BOVINO EN EL MUNICIPIO DE GUERRERO, CHIHUAHUA

El agua es un recurso estratégico para el desarrollo económico, social y ambiental, cuya valoración económica y uso eficiente resultan esenciales ante los crecientes niveles de escasez hídrica, especialmente en regiones áridas y semiáridas. En México, el sector agrícola concentra el 76.3 % del uso consuntivo nacional, lo que refleja una alta dependencia de este recurso y la necesidad de adoptar modelos de gestión más sostenibles. La huella hídrica constituye un indicador clave para cuantificar el volumen total de agua empleada en los sistemas productivos. El presente estudio tuvo como objetivo estimar la huella hídrica verde y azul asociada a la producción de carne bovina de la raza Salers bajo un sistema intensivo estabulado en el municipio de Guerrero, Chihuahua. Se aplicó la metodología de la *Water Footprint Network* (WFN), considerando los componentes verde y azul. Se analizaron datos de una unidad productiva con 60,088 cabezas de ganado y una dieta compuesta principalmente por maíz, avena y alfalfa. Los resultados muestran una huella hídrica total de 3,400.87 L/kg de carne producida, valor inferior al promedio global reportado, pero ligeramente superior al registrado en estudios nacionales similares. Las diferencias se atribuyen a la composición de la dieta, la eficiencia alimenticia y las condiciones agroclimáticas locales. Estos hallazgos aportan información valiosa para la gestión integrada del recurso hídrico y el diseño de políticas públicas orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector pecuario en regiones con estrés hídrico.

Palabras clave: huella hídrica, ganadería bovina, sostenibilidad, eficiencia hídrica, Chihuahua.

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

Autor: Nayeli Sosa Márquez.

Director de tesis: Ramón Valdivia Alcalá.

ABSTRACT

ESTIMATION OF THE WATER FOOTPRINT IN BEEF CATTLE PRODUCTION IN THE MUNICIPALITY OF GUERRERO, CHIHUAHUA.

Water is a strategic resource for economic, social, and environmental development, whose economic valuation and efficient use are essential in the face of increasing water scarcity, particularly in arid and semi-arid regions. In Mexico, the agricultural sector concentrates 76.3% of national consumptive water use, which reflects a high dependence on this resource and the need to adopt more sustainable management models. The water footprint is a key indicator to quantify the total volume of water used in production systems. This study aimed to estimate the green and blue water footprints associated with the production of beef from Salers cattle raised under an intensive stable system in the municipality of Guerrero, Chihuahua. The methodology proposed by the Water Footprint Network (WFN) was applied, considering both the green and blue components. Data was analyzed from a production unit comprising 60,088 heads of cattle, with a diet mainly based on corn, oats, and alfalfa. The results indicate a total water footprint of 3,400.87 L/kg of beef produced, a value lower than the global average reported, but slightly higher than those found in similar national studies. The differences are attributed to diet composition, feed efficiency, and local agroclimatic conditions. The findings provide valuable insights for integrated water resource management and for the design of public policies aimed at improving efficiency and sustainability in the livestock sector in water-stressed regions.

Keywords: water footprint, beef cattle, sustainability, water efficiency, Chihuahua.

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

Author: Nayeli Sosa Márquez

Thesis Advisor: Dr. Ramón Valdivia Alcalá

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El agua es un recurso esencial para la vida y un factor estratégico en el desarrollo de las sociedades. Su disponibilidad influye directamente en la salud pública, la calidad de vida, la producción de alimentos, el crecimiento económico y la estabilidad de los ecosistemas (FAO, 2023). En consecuencia, la gestión sostenible del agua constituye uno de los principales retos del siglo XXI.

De acuerdo con la FAO (2013), el uso de agua sin restricciones aumentó a nivel global a un ritmo de más del doble del crecimiento de la población durante el siglo XX, lo que ha llevado a que actualmente en numerosas regiones no sea posible garantizar un suministro de agua confiable. Factores como la presión demográfica, el acelerado desarrollo económico, la urbanización y la contaminación están ejerciendo una presión sin precedentes sobre un recurso renovable pero finito, especialmente en regiones áridas y semiáridas.

Paralelamente, los efectos del cambio climático están agravando la crisis del agua a nivel global. Según proyecciones del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021), se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos extremos, como inundaciones y sequías, debido a cambios en los patrones de precipitación.

El incremento en la producción y el consumo de bienes y servicios ha intensificado la demanda de recursos hídricos, generando una presión considerable sobre su disponibilidad. Esta situación no solo ha derivado en una contaminación significativa que compromete la calidad del agua, sino que también ha contribuido al aumento del estrés hídrico, lo que pone en riesgo la seguridad alimentaria, energética y ambiental. (SEMARNAT, 2018).

En este contexto, garantizar la seguridad hídrica tanto en México como a nivel global requiere replantear los modelos tradicionales de gestión del agua y profundizar en la comprensión de los retos asociados a este recurso. La estrategia debe orientarse hacia un manejo que priorice la sostenibilidad, la

eficiencia y la equidad, garantizando el acceso al agua para las generaciones presentes y futuras. Bajo esta perspectiva, la huella hídrica se plantea como una herramienta novedosa que permite analizar de manera integral los patrones de uso del recurso, aportando información clave para enfrentar los desafíos actuales y promover una gestión más responsable.

El concepto, los componentes y la metodología de la huella hídrica fueron desarrollados por Hoekstra (2003). Este indicador no solo mide el volumen de agua utilizado directa o indirectamente en la producción de un bien o servicio, sino que también identifica el lugar y el momento en que se utilizó, así como el tipo de agua empleada: agua de lluvia (huella hídrica verde), agua superficial y subterránea (huella hídrica azul), o agua requerida para diluir los contaminantes en cuerpos receptores (huella hídrica gris). De esta manera, la huella hídrica incorpora una dimensión temporal y espacial, integra aspectos tanto cuantitativos como cualitativos, permite evaluar su sostenibilidad y determina cómo el consumo de un producto en un lugar específico impacta los recursos hídricos en el sitio donde se produjo (Vázquez & Lambarri, 2017).

La huella hídrica de consumo en México se encuentra entre las ocho mayores a nivel mundial. Del total del consumo, solo el 2.7 % corresponde al sector industrial y el 5.3 % al doméstico, mientras que la agricultura representa el 92 %. A nivel nacional, la huella hídrica alcanza 197,425 mil (Hm³) (SIAP, 2016).

Actualmente, el sector agropecuario en México es uno de los pilares fundamentales de la economía y la sociedad del país. Desempeña un papel crucial en la producción de alimentos, la generación de empleos y el desarrollo rural. Sin embargo, también enfrenta desafíos significativos, especialmente en relación con el uso del agua.

En particular, la producción ganadera, especialmente la de bovinos, representa uno de los sectores con mayor impacto en el consumo de agua, tanto de manera directa como indirecta (Mekonnen & Hoekstra, 2012). Este fenómeno adquiere especial relevancia en regiones áridas y semiáridas como el estado de

Chihuahua, donde la escasez hídrica es un factor crítico para el desarrollo sostenible.

La huella hídrica es un indicador que permite cuantificar el volumen total de agua dulce utilizado para producir bienes y servicios, considerando no solo el consumo directo, sino también el agua incorporada en los insumos y procesos productivos (Hoekstra *et al.*, 2011). En el caso de la producción de bovinos, la huella hídrica incluye el agua utilizada para el riego de cultivos forrajeros, el consumo directo de los animales y el procesamiento de la carne y otros derivados (Pimentel *et al.*, 2004). Estudios previos han demostrado que la producción de un kilogramo de carne de res puede requerir entre 15,000 y 20,000 litros de agua, dependiendo de las prácticas de manejo y las condiciones climáticas (Mekonnen & Hoekstra, 2010).

Esta investigación busca contribuir al conocimiento sobre la huella hídrica en la producción de bovinos en Chihuahua al estimar la huella hídrica en la engorda de ganado, con el fin de identificar los principales factores que influyen en el consumo de agua y proponer medidas para mejorar su uso y aprovechamiento. Los resultados de este estudio no solo serán relevantes para el sector ganadero, sino también para la formulación de políticas públicas orientadas a la gestión sostenible del agua en regiones áridas.

1.1 Planteamiento del problema.

En las últimas décadas, el aumento desmedido de la demanda de agua y su manejo inadecuado han exacerbado la contaminación y el estrés hídrico a nivel global. Esta problemática ha generado impactos negativos en la salud pública, la sostenibilidad ambiental, el crecimiento económico y la seguridad alimentaria y energética. En consecuencia, el agua ha pasado de ser un recurso que impulsa el bienestar social, ecológico y económico a convertirse en un factor que condiciona dichos aspectos (Vázquez & Lambarri, 2017).

De acuerdo con la FAO (2023), la agricultura concentra más del 70 % de la extracción de agua dulce a escala mundial y más del 90 % de su uso consuntivo. El crecimiento demográfico y los cambios en los patrones de

consumo alimentario incrementan la presión sobre este recurso, pues se estima que para 2050 será necesario producir 1 billón de toneladas adicionales de cereales y 200 millones de toneladas de carne (FAO, 2013). En este panorama, el sector agropecuario desempeña un papel esencial en la provisión de alimentos, aunque su producción implica una alta demanda hídrica.

Particularmente, la ganadería bovina se distingue por el uso intensivo de agua a lo largo de su cadena productiva, ya que se requiere para el riego de cultivos forrajeros, el consumo animal, las labores de limpieza y los procesos de transformación (Steinfeld *et al.*, 2009). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2024a), el uso consuntivo de agua en México se distribuye principalmente entre el sector agrícola (76.3%), el abastecimiento público (14.8%), la industria autoabastecida (4.8%) y la generación de energía eléctrica (4.1%).

En el estado de Chihuahua, la actividad agropecuaria constituye uno de los pilares económicos más relevantes. La superficie agrícola asciende a 1.12 millones de hectáreas, de las cuales el 51 % corresponde a tierras de riego. No obstante, la dependencia del uso de aguas subterráneas ha provocado un progresivo abatimiento de los acuíferos, situación agravada por la disminución en la disponibilidad y calidad del recurso (INIFAP, 2021).

El municipio de Guerrero, con una importante vocación ganadera, ocupa el séptimo lugar estatal en el inventario de bovinos (INEGI, 2023). Sin embargo, enfrenta un escenario de alta presión hídrica: la precipitación anual oscila entre 400 y 500 mm, y los acuíferos presentan un déficit estimado de 9.36 millones de m³ (CONAGUA, 2024a; SMN, 2024). Estas condiciones ponen en evidencia la vulnerabilidad del sistema productivo local y la necesidad de adoptar estrategias que promuevan la sostenibilidad hídrica.

Además del impacto ambiental, el uso ineficiente del agua en la producción pecuaria representa un costo económico significativo, ya que incrementa los gastos asociados al bombeo, al riego y a la alimentación animal. Esto limita la rentabilidad y la competitividad del sistema productivo local. A pesar de ello,

existe escasa información sobre la magnitud y distribución del consumo hídrico en los diferentes componentes del sistema de producción bovina en Guerrero, Chihuahua.

1.2 Objetivos de la investigación

A continuación, se expone el objetivo general de la investigación, así como los objetivos específicos que lo complementan.

1.2.1 Objetivo general.

- Estimar la huella hídrica azul y verde de la producción de carne bovina estabulada en el estado de Chihuahua, con el fin de promover un uso más eficiente y sostenible del agua.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Estimar la huella hídrica de la carne de bovino de producción estabulada de la raza Salers, con una dieta establecida, en el municipio de Guerrero, Chihuahua.
- Identificar los principales componentes que integran la HH.
- Proponer acciones que permitan reducir la huella hídrica en la producción de carne bovina en Chihuahua.

1.3 Hipótesis de la investigación.

Con base en los objetivos y preguntas de investigación, se plantean las siguientes hipótesis

1.3.1 Hipótesis general.

- La evaluación de la huella hídrica en el proceso productivo de carne bovina estabulada en Chihuahua, permitirá cuantificar su impacto en el consumo de agua y contribuirá a la sostenibilidad ambiental, social y económica de la actividad ganadera en la región.

1.3.2 Hipótesis específicas.

- Se estima la huella hídrica de la carne de res producida en un sistema intensivo, utilizando una dieta específica y una tasa de conversión alimentaria determinada en el proceso productivo de carne bovina

estabulada. La eficiencia de este sistema da como resultado una huella hídrica inferior a la reportada en la literatura.

- La implementación de mejoras en la eficiencia del uso del agua en la alimentación, manejo y producción del ganado bovino permite una reducción significativa de la huella hídrica asociada a la producción de carne.
- La cuantificación de la huella hídrica facilitará la formulación de estrategias entre el gobierno, el sector empresarial y la sociedad civil para el uso, protección y gestión de los recursos hídricos, con el propósito de equilibrar la productividad ganadera y la conservación del agua a largo plazo.

1.4 Justificación.

El agua desempeña un papel esencial en el equilibrio entre la eficiencia económica, la sostenibilidad ambiental y la equidad social, por lo que resulta prioritario establecer medidas que aseguren una gestión sostenible capaz de responder a las crecientes demandas y presiones sobre este recurso. (FAO, 2023).

De acuerdo con el INEGI (2024), el estado de Chihuahua abarca una superficie de 247,460 km², lo que equivale al 12.6% del territorio nacional, con predominio de zonas áridas y semiáridas. La cría de ganado bovino es la segunda actividad económica más relevante del sector primario en la región.

En las últimas décadas, el cambio climático ha modificado los patrones de precipitación en el estado, afectando tanto la cantidad como la disponibilidad de agua. Esta creciente escasez hídrica ha generado serias repercusiones en la salud pública, la sostenibilidad ambiental, el desarrollo económico y la seguridad alimentaria, haciendo que el agua se convierta en un recurso con disponibilidad impredecible. Es así como surge el interés por investigar la huella hídrica de la producción de ganado bovino en Chihuahua.

Estimar la huella hídrica permitirá conocer el volumen total de agua dulce utilizado directa o indirectamente, a lo largo de toda la cadena productiva de

engorda de bovinos, ayudando a comprender los efectos del consumo y el comercio, frente a la disponibilidad de agua. Su estudio dará pauta para identificar cómo y dónde el consumo en un lugar impacta los recursos hídricos de otro lugar. Asimismo, la información obtenida ayudará a identificar oportunidades para reducir el consumo de agua, mitigar el impacto ambiental de la producción ganadera y formular estrategias de gestión responsable de los recursos naturales en un contexto de cambio climático y creciente demanda de alimentos.

1.5 Estructura del documento

La tesis se organiza en cuatro capítulos que, de manera complementaria, permiten desarrollar el análisis sobre la estimación de la huella hídrica en la producción bovina en el municipio de Guerrero, Chihuahua.

El primer capítulo presenta los fundamentos conceptuales y metodológicos de la investigación. Incluye la introducción y contextualización de la problemática hídrica a nivel global y nacional, los objetivos, las hipótesis y la justificación, destacando la relevancia social, económica y ambiental del estudio.

El segundo capítulo desarrolla la revisión de literatura. En una primera parte, se abordan aspectos generales del recurso hídrico en México, tales como su distribución, la gestión integrada, la escasez y el estrés hídrico, así como elementos vinculados con la valoración económica del agua. En la segunda parte, se profundiza en el concepto de huella hídrica, sus componentes metodológicos (verde, azul y gris) y su aplicación en los sectores agrícola y pecuario. También se revisan investigaciones relevantes realizadas en México y en otros países, lo que permite identificar antecedentes, tendencias y brechas de conocimiento que respaldan la pertinencia de este trabajo.

El tercer capítulo corresponde a un artículo académico. El estudio se centra en la estimación de la huella hídrica azul y verde en la producción de carne bovina estabulada de raza Salers en el municipio de Guerrero. La metodología empleada se basa en la propuesta de Mekonnen y Hoekstra (2012), adaptada al contexto local y a la dieta utilizada en el sistema de engorda.

El cuarto capítulo presenta las conclusiones del estudio. En este apartado se sintetizan los principales hallazgos obtenidos a partir del análisis teórico y empírico, destacando la importancia del recurso hídrico en la producción bovina y la utilidad de la huella hídrica como herramienta para evaluar su uso.

En conjunto, la estructura del documento permite un tránsito ordenado desde los fundamentos conceptuales y metodológicos hasta el análisis empírico, proporcionando evidencia científica y práctica. Así, el estudio genera un diagnóstico sólido y fundamentado que puede orientar eficazmente la formulación de políticas públicas y estrategias de gestión hídrica, promoviendo la sostenibilidad y eficiencia en la producción agrícola y pecuaria.

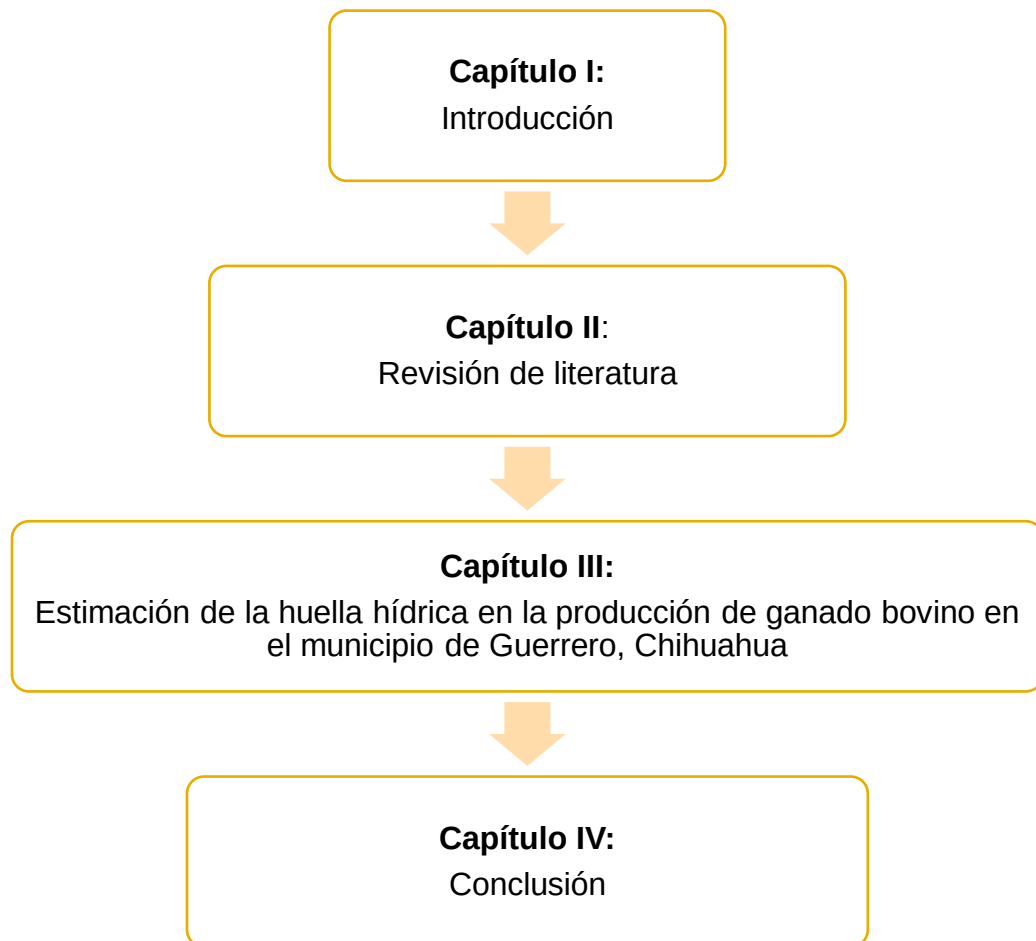


Figura 1. Estructura del documento de tesis

Fuente: Elaboración propia.

1.6 Literatura citada

- 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
- 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>
- 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., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint assessment manual: Setting the global standard. Earthscan.
- INEGI. (2023). Censo Agropecuario 2022: Resultados definitivos. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf
- INEGI. (2024). México en cifras — Área geográfica: Chihuahua. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=08#collapse-Resumen>
- INIFAP. (2021). Reporte anual 2021: Ciencia y tecnología para el campo mexicano, Chihuahua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/786721/REPORTE_ANUAL_CIRNOC_Chihuahua.pdf

- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. <https://www.ipcc.ch>
- 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. (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->
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E., & Nandagopal, S. (2004). Water resources: Agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909–918. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0909:WRAAEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2)
- SEMARNAT. (2018). Informe de la situación del medio ambiente en México: Compendio de estadísticas ambientales.
- SIAP. (2016). La huella hídrica: el agua que usamos. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/articulos/la-huella-hídrica-el-agua-que-usamos>
- SMN. (2024). Normales climatológicas por estado — Chihuahua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=chih>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., & Rosales, M. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones.
- Vázquez del Mercado Arribas, R., & Lambarri Beléndez, J. (Eds.). (2017). Huella hídrica en México: Análisis y perspectivas. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

En este capítulo se aborda en un apartado la literatura relativa a aspectos generales con relación a la problemática que se enfrenta en el sector hídrico en general y en otro la que corresponde a la temática específica de la huella hídrica en sus diferentes vertientes.

2.1 Aspectos generales del recurso hídrico

Las actividades humanas generan una presión considerable sobre el ciclo hidrológico, tanto de forma directa como indirecta, lo que ha derivado en impactos negativos en diversas regiones. Estos efectos no solo afectan la calidad de vida de la población, sino también la estabilidad de los ecosistemas y la biodiversidad. En un contexto de crecimiento demográfico y aumento del poder adquisitivo, la demanda de alimentos, energía y agua ha aumentado significativamente. Esto ha llevado a una mayor extracción y uso del recurso hídrico, afectando tanto su disponibilidad como su calidad en los reservorios naturales. (CONAGUA, 2024a)

En México se reconoce al agua como un asunto estratégico y de seguridad nacional; al día de hoy, se ha convertido en elemento central de la política ambiental, y más aún, en un factor clave de la política de desarrollo social y de la política económica; su disponibilidad condiciona la posibilidad de desarrollo de algunas regiones del país y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población. (CONAGUA, 2006, p. 4)

Según la SEMARNAT (2018), en México, las aguas superficiales y subterráneas son consideradas bienes nacionales. La gestión de estos recursos hídricos recae en el Poder Ejecutivo, que opera a través de dos mecanismos fundamentales: por un lado, la Ley de Aguas Nacionales, la cual define los principios y herramientas necesarias para su uso racional y conservación; y por otro, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), organismo encargado de regular y administrar el acceso y aprovechamiento del agua en el país.

2.1.1 Distribución y estructura hidrológica en México

A nivel nacional la CONAGUA identifica 37 regiones hidrológicas (RH) como se muestra en la figura 2, las cuales están determinadas por la distribución de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, así como por factores climáticos, geológicos y topográficos. Una región hidrológica está integrada por una o varias cuencas hidrológicas. (CONAGUA, 2024a). Las regiones hidrológicas cumplen una función fundamental en la planificación y manejo de los recursos hídricos, ya que permiten comprender la disponibilidad, demanda y calidad del agua en distintas áreas del país. Además, facilitan la identificación de zonas de estrés hídrico y la formulación de estrategias de conservación y aprovechamiento sostenible del agua (DOF, 2020).



Figura 2. Regiones hidrológicas

Fuente: CONAGUA, 2024a

Según la SEMARNAT (2013), las cuencas hidrográficas son “espacios territoriales delimitados por un parteaguas donde se concentran todos los escurrimientos que confluyen y desembocan en un punto común llamado punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (cuenca endorreica) o el mar (cuenca exorreica).”

Las cuencas hidrográficas, son esenciales para el ciclo hidrológico, ya que delimitan el área de captación de las precipitaciones y su posterior escurrimiento hacia cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Asimismo, al constituir unidades territoriales integradas, permiten la identificación y cuantificación de los impactos acumulativos generados por las actividades humanas y otras externalidades. Para la administración de las aguas nacionales la CONAGUA definió 757 cuencas hidrológicas. La gestión adecuada de estas cuencas es esencial para garantizar la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la región. (SEMARNAT, 2013)

De acuerdo con la CONAGUA (2024a), las cuencas del país, como se mencionó anteriormente, están organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH), las cuales, para fines administrativos, se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA). Estas regiones sirven como base para la implementación de políticas públicas, la regulación del uso del agua y la ejecución de programas de infraestructura hídrica.



Figura 3. Regiones Hidrológicas-Administrativas (RHA) y Acuíferos

Fuente: CONAGUA, 2024a

El estado de Chihuahua enfrenta importantes limitaciones en cuanto a la disponibilidad de agua, derivadas en gran medida de sus condiciones hidrográficas y climáticas. Una característica destacada es la presencia de cuencas endorreicas, las cuales carecen de salidas naturales hacia el mar. Esta condición restringe el escurrimiento superficial y favorece la acumulación de agua en cuerpos cerrados o su infiltración en el subsuelo, lo que incrementa significativamente la dependencia de fuentes subterráneas (SEMARNAT, 2018).

En este panorama, el municipio de Guerrero, ubicado en la zona occidental del estado, se encuentra dentro de la Región Hidrológica No. 9: Sonora Sur y la Región Hidrológica Administrativa II: Noroeste (INEGI, 2025). Ambas regiones se caracterizan por su baja disponibilidad de agua superficial y una fuerte dependencia del agua subterránea, la cual es extraída principalmente de acuíferos que abastecen tanto al sector agrícola como al consumo humano y pecuario.



Figura 4. Ubicación del municipio de Guerrero, Chihuahua

Fuente: INEGI, 2025

Asimismo, Guerrero forma parte de la cuenca del río Yaqui, dentro de la subcuenca del río Papigochi, el cual recorre el municipio de sur a norte y recibe aportaciones de varios afluentes como los ríos Pichachi, Tomochi y Basúchil (INEGI, 2010). Este sistema fluvial representa una fuente vital para la captación,

almacenamiento y distribución del recurso hídrico, especialmente a través de la presa Abraham González (véase figura 5), que permite regular el flujo y destinar agua principalmente para riego agrícola. Desde el punto de vista climático, las temperaturas medias rondan los 14 °C y la precipitación disminuye a valores cercanos a los 400–500 mm anuales (INEGI, 2010).

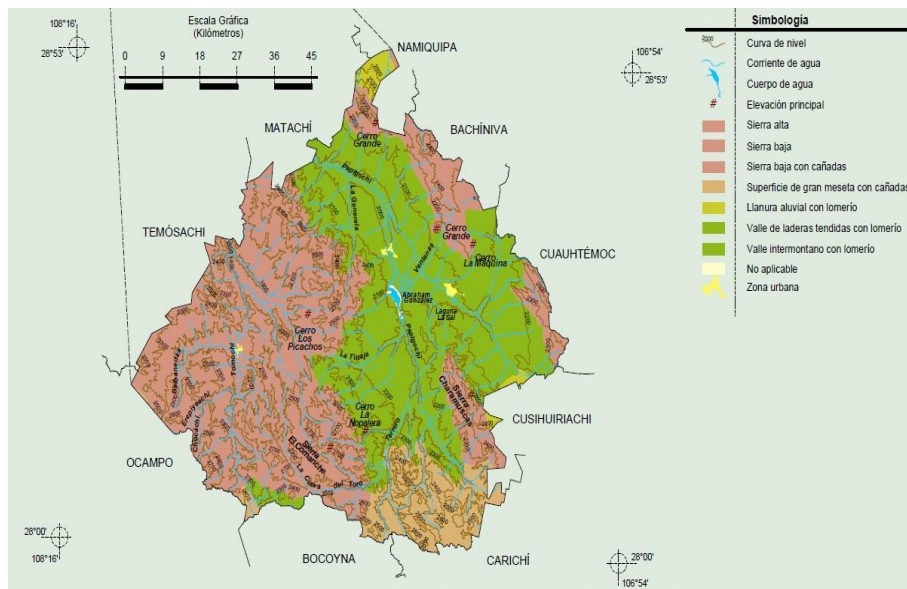


Figura 5. Hidrografía y relieve del municipio de Guerrero, Chihuahua

Fuente: INEGI, 2010

El acuífero Guerrero–Yepómera (clave 0860) constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua subterránea en la región occidental del estado de Chihuahua. Cubre una superficie aproximada de 4,563 km², abarcando parcialmente los municipios de Guerrero, Bachíniva y Cusihuiriachi, entre otros, donde el recurso hídrico subterráneo resulta esencial para el abastecimiento público urbano, el riego agrícola, la ganadería y los servicios locales (CONAGUA, 2024b). Su importancia estratégica radica en que sustenta actividades productivas de alta demanda hídrica, como la agricultura y la ganadería, además de proveer agua para el consumo humano y contribuir al flujo base de ríos regionales como el Papigochic y el Basúchil.

La situación actual del acuífero es crítica, dado que las extracciones superan a la recarga natural. De acuerdo con la CONAGUA, (2024b), la recarga media

anual es de 146.0 hm³/año, mientras que las extracciones alcanzan 155.36 hm³/año, lo que genera una disponibilidad media anual negativa de -9.36 hm³/año. En consecuencia, el acuífero se encuentra en condición de sobreexplotación y no existen volúmenes disponibles para otorgar nuevas concesiones.

En cuanto a la gestión, los volúmenes de agua subterránea se asignan principalmente a usos consuntivos, es decir, aquellos en los que el agua se consume en el proceso y no retorna al sistema, tales como el agrícola, pecuario, de servicios y el público-urbano (DOF, 2020). La determinación de la disponibilidad para estos usos se establece conforme a la NOM-011-CONAGUA-2015, la cual define el método oficial para estimar la disponibilidad media anual de aguas nacionales (DOF, 2015).

En el caso del acuífero Guerrero–Yepómera, la extracción se destina principalmente al uso agrícola (88 %), seguido por el público-urbano (7 %), el doméstico (3 %) y, en menor proporción, los usos industrial, múltiple y pecuario (DOF, 2025). De esta forma, la designación de usos consuntivos en el acuífero cumple un papel clave en la regulación de concesiones y en la definición de estrategias de sostenibilidad hídrica (figura 6).

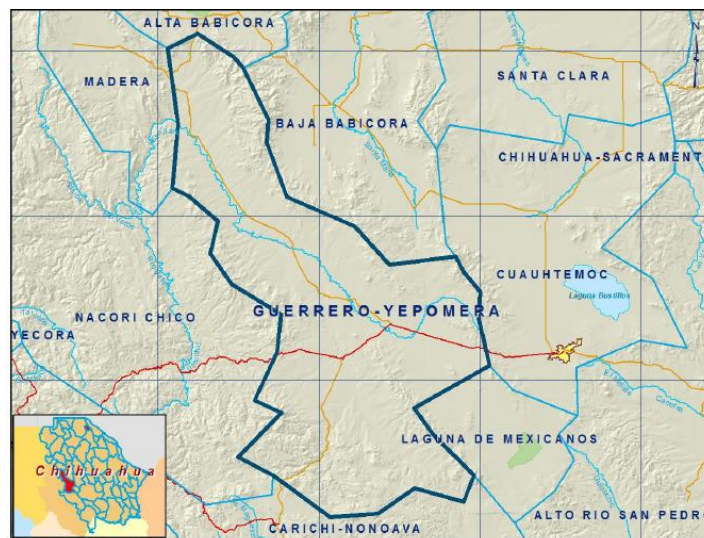


Figura 6. Localización del acuífero Guerrero–Yepómera

Fuente: CONAGUA, 2024b

Aguas Superficiales

Este tipo de recurso hídrico comprende ríos, arroyos, lagos, lagunas y presas, cuya disponibilidad y calidad están estrechamente vinculadas con la precipitación pluvial y el manejo de las cuencas hidrográficas. Según datos de la CONAGUA (2024a), los ríos y arroyos del país “constituyen una red hidrográfica de aproximadamente 633 mil kilómetros, en la que destacan 51 ríos principales por los que fluye el 85.7% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie continental del país” (figura 7).



Figura 7. Ríos principales de México

Fuente: CONAGUA, 2024a

Las aguas superficiales son fundamentales para la seguridad hídrica y alimentaria de México, al proveer insumos esenciales para la producción agropecuaria e industrial y sustentar actividades recreativas, turísticas y culturales. Sin embargo, enfrentan desafíos estructurales, entre los que destacan la disminución de caudales y el incremento del estrés hídrico en zonas áridas y semiáridas del norte y centro del país, producto de la sobreexplotación y las sequías recurrentes. A ello se suman la contaminación, la infraestructura

hidráulica insuficiente u obsoleta y una gestión fragmentada entre distintos niveles de gobierno y sectores productivos. (CONAGUA, 2022)

Aguas subterráneas

Dentro de las cuencas hidrográficas se localizan los acuíferos, reservas subterráneas de agua que desempeñan un papel esencial en el equilibrio hídrico y en el desarrollo socioeconómico del país. Gracias a sus características físicas, funcionan como sistemas naturales de almacenamiento y distribución, lo que permite la extracción de agua durante todo el año desde prácticamente cualquier punto de su superficie. Además, actúan como filtros purificadores, ayudando a conservar la calidad del agua. Para fines de administración del agua, el país se ha dividido en 653 acuíferos. (CONAGUA, 2022).

Los acuíferos constituyen una de las principales fuentes de suministro, tanto para el consumo humano como para las actividades agropecuarias, industriales y domésticas. En 2022, el 39.9% del volumen total de agua concesionada para usos consuntivos en México provenía de fuentes subterráneas, mientras que el 60.1% restante corresponde a fuentes superficiales (ríos, arroyos, lagos). En la figura 8 se observan la evolución del volumen concesionado para usos consuntivos del 2001 al 2022. (CONAGUA, 2024a).

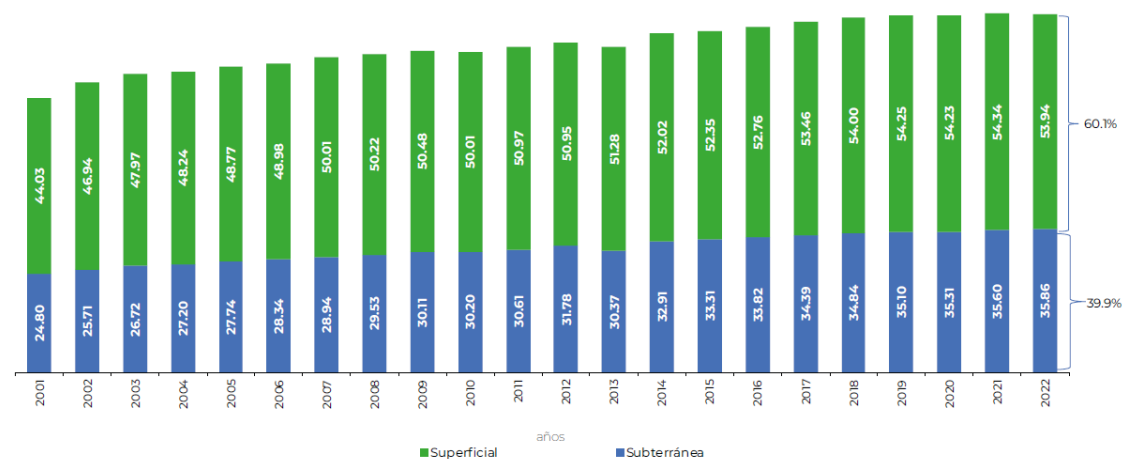


Figura 8. Volumen concesionado para usos consuntivos por tipo de fuente, 2001-2022 (miles de hm³)
Fuente: CONAGUA, 2024a

No obstante, la sobreexplotación de los acuíferos ha generado un desequilibrio entre la recarga natural y la extracción del agua subterránea, comprometiendo su disponibilidad a futuro (Martínez & Patiño, 2012). De acuerdo con datos de la CONAGUA (2024a), la sobreexplotación de los acuíferos en México constituye una problemática creciente que pone en riesgo la sustentabilidad del recurso hídrico subterráneo. En 1975 se registraron 32 acuíferos en situación de sobreexplotación; sin embargo, para el año 2020 esta cifra se incrementó a 111, lo que representa aproximadamente el 17 % del total de los 653 acuíferos identificados a nivel nacional (véase figura 9).

Adicionalmente, para los años 2021 y 2022 se reportaron 32 acuíferos con presencia de suelos salinos y aguas subterráneas salobres, así como 18 acuíferos costeros afectados por procesos de intrusión salina, fenómenos que comprometen la calidad del agua y limitan su aprovechamiento en diversos sectores. En contraste, únicamente 378 acuíferos se encontraban en condiciones de disponibilidad (CONAGUA, 2024a).

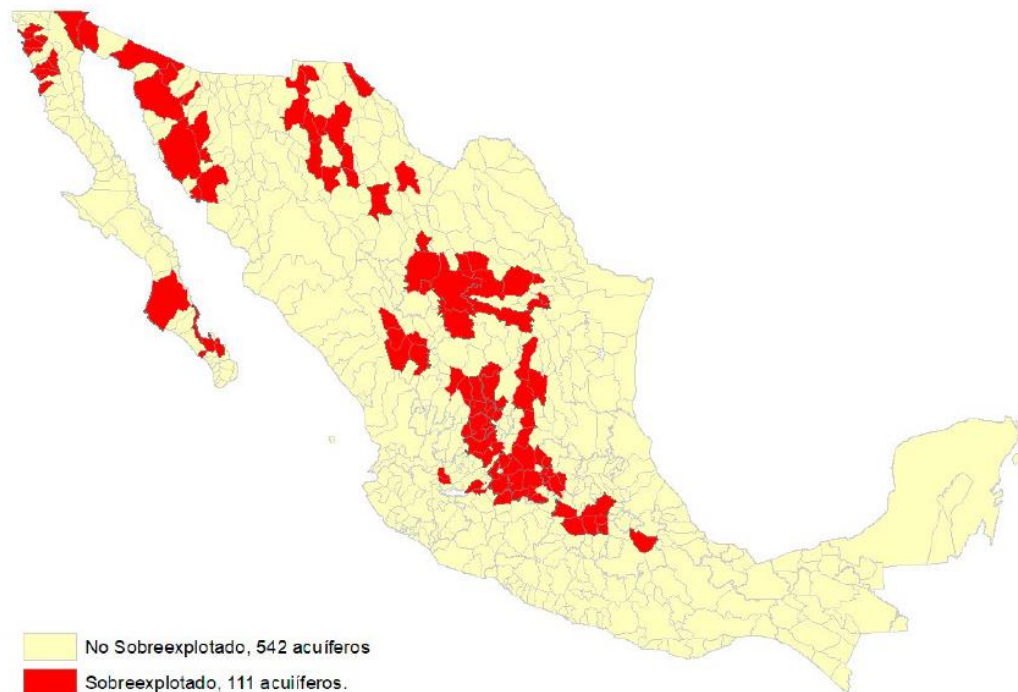


Figura 9. Acuíferos sobreexplotados en 2021 y 2022

Fuente: CONAGUA, 2024a

En las últimas décadas, la extracción de aguas subterráneas aumentó de forma notable tanto en magnitud como en frecuencia. Para los agricultores, este recurso representa una ventaja significativa al proporcionar un suministro de agua flexible y disponible bajo demanda para el riego. Si bien esta intensificación contribuyó positivamente al desarrollo de millones de personas en zonas rurales, también ha generado impactos negativos, como el agotamiento progresivo de los acuíferos, la contaminación del agua subterránea y la intrusión de agua salina en acuíferos costeros de gran importancia. (FAO, 2013)

En el acuífero Guerrero–Yepómera se ha registrado un abatimiento significativo del nivel freático. Durante el periodo 2009-2013, la evolución media anual fue de -1.0 metro, con descensos localizados que alcanzaron hasta -4.0 metros. Este comportamiento evidencia una tendencia de sobreexplotación que podría intensificarse ante el aumento de la demanda de agua subterránea, generando efectos adversos como la profundización del nivel estático, la inutilización de pozos, el aumento de los costos de bombeo, la reducción o desaparición de manantiales y caudales base hacia los ríos, así como el deterioro de la calidad del agua subterránea (DOF, 2025). Frente a ello, es necesario implementar medidas de gestión y conservación que eviten un desequilibrio hídrico y protejan las actividades socioeconómicas dependientes de este recurso en la región.

Según datos de la CONAGUA (2024a), durante los años 2021 y 2022 se identificaron 32 acuíferos en México con presencia de suelos salinos y agua salobre, localizados principalmente en la Península de Baja California y en el altiplano mexicano. Asimismo, en ese mismo periodo se registró intrusión marina en 18 acuíferos costeros distribuidos a lo largo del territorio nacional (véase Figura 10).

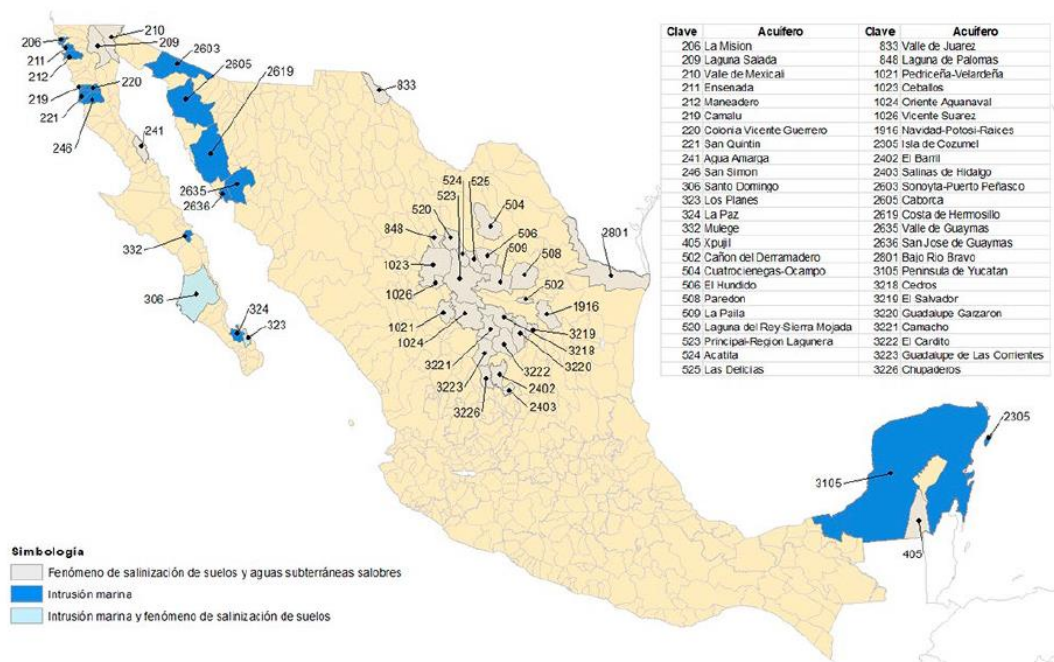


Figura 10. Acuíferos con intrusión marina y/o salinización de suelos y aguas subterráneas salobres, 2021 y 2022

Fuente: CONAGUA, 2024a

2.1.2 Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH)

De acuerdo con Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2015), los recursos hídricos “incluyen el agua, los medios a través de los cuales ese recurso discurre y se almacena: glaciares, laderas, lagunas y lagos, manantiales, ríos y riachuelos, acuíferos y las obras construidas por el hombre, como represas, pozos, canales y drenes”.

Los recursos hídricos son fundamentales para sostener la vida, el funcionamiento de los ecosistemas, la producción de alimentos, el desarrollo industrial y el bienestar de las poblaciones. La disponibilidad y calidad del recurso se han convertido en factores críticos que condicionan el crecimiento económico, la seguridad alimentaria y la estabilidad social.

En México, la gestión del agua la establece la Ley de Aguas Nacionales, a través del Plan Nacional Hídrico. Se asigna a la CONAGUA la administración y gestión del recurso hídrico, a través de planes y normativas para el uso sostenible del recurso (DOF, 2020).

La gestión de los recursos hídricos abarca el conjunto de prácticas que realizan las personas y las empresas privadas en los territorios de su propiedad o alquiler, así como las que realizan las entidades con responsabilidad pública, incluyendo las organizaciones de usuarios y las entidades del Estado, para la adecuada conservación y funcionamiento de los recursos hídricos. La gestión incluye todas las acciones que permiten el uso racional del agua, su ahorro y la preservación de su calidad. (IICA, 2015, p. 17)

De acuerdo con el IICA (2020), una gestión eficiente del agua implica considerar la seguridad hídrica como un eje estratégico para el desarrollo sostenible, asegurando la disponibilidad de agua para diversos usos, sin comprometer los ecosistemas ni las necesidades de las generaciones futuras. Esto requiere un enfoque integrado y territorial, considerando las particularidades ecológicas, sociales y económicas de cada región.

“La gestión del agua debe trascender la simple administración del recurso e incorporar la planificación, la participación de múltiples actores, y la adopción de tecnologías que promuevan la eficiencia en su uso” (IICA, 2020, p. 15).

Una herramienta clave en este enfoque es la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), que busca coordinar el desarrollo y manejo del agua, la tierra y los recursos relacionados, a fin de maximizar el bienestar económico y social de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

En el caso de sistemas agropecuarios como la producción bovina, la GIRH adquiere especial relevancia debido a la alta demanda de agua para la producción de forrajes, el abasto a los animales y la limpieza de instalaciones. El IICA plantea que una gestión moderna del agua en el sector agrícola debe orientarse a tres ejes: eficiencia, sostenibilidad e inclusión.

“La sostenibilidad de los sistemas alimentarios depende en gran medida del manejo responsable del agua en la agricultura. Es necesario transitar hacia

modelos productivos que reduzcan la huella hídrica sin afectar la productividad ni el bienestar rural" (IICA, 2021).

Gestionar los recursos hídricos implica una doble responsabilidad: una de carácter colectivo y otra individual. A nivel colectivo, se refiere al manejo del agua que fluye en espacios compartidos, lo cual requiere acciones como la protección de laderas y vertientes, así como la coordinación entre distintos usuarios para una distribución equitativa del recurso. En esta gestión es trascendental fortalecer mecanismos de gobernanza como los consejos de cuenca y las juntas de usuarios, que permiten organizar y regular el acceso al agua de forma participativa. Por otro lado, en el ámbito privado, especialmente en unidades productivas agrícolas, ganaderas, agroindustriales y otros sectores, la responsabilidad se enfoca en el uso eficiente y sostenible del recurso. Esto incluye prácticas orientadas al ahorro de agua, la reducción de pérdidas por fugas o mal manejo, y la prevención de la contaminación por agroquímicos, residuos animales o vertidos industriales. En este nivel, el compromiso es crucial, ya que una buena gestión dentro de los predios no solo preserva la calidad del agua como bien común, sino que también contribuye a mejorar la rentabilidad de los productores y a disminuir los efectos negativos del cambio climático sobre sus actividades (IICA, 2015).

En contextos de escasez o sobreexplotación de acuíferos, como en muchas regiones de México, la gestión de los recursos hídricos también debe contemplar la implementación de políticas públicas que promuevan el uso racional del agua, la modernización del riego, la revalorización económica del recurso y la creación de instrumentos regulatorios y financieros que incentiven prácticas sostenibles.

Asimismo, el IICA (2020) destaca la importancia de la participación de los actores locales en los procesos de toma de decisiones y en la gobernanza del agua. Las organizaciones de usuarios, los productores, las comunidades rurales y las autoridades locales tienen un papel clave en el monitoreo, conservación y uso responsable del recurso hídrico. La gestión del agua también implica

evaluar y monitorear su uso a través de indicadores como la huella hídrica, que permite identificar puntos críticos en las cadenas productivas. Este tipo de información es esencial para tomar decisiones informadas sobre la reconversión productiva, la tecnificación del campo o la implementación de buenas prácticas agropecuarias.

La gestión de los recursos hídricos, en términos de cantidad, distribución y calidad, es una de las principales prioridades a nivel mundial. Para abordar este desafío, los responsables de formular políticas públicas requieren estadísticas precisas sobre la disponibilidad, extracción, uso y retorno del agua. Esta información es clave para estimar la cantidad de recursos hídricos disponibles, monitorear la extracción de cuerpos de agua para prevenir su sobreexplotación, garantizar un acceso equitativo al recurso y evaluar el volumen de agua que retorna al ambiente (CEPAL, 2024).

La agricultura, sector que históricamente ha sido el mayor consumidor de agua, se encuentra en una posición particularmente vulnerable debido a la intensificación de la disputa por el acceso y uso de este recurso.

Los cambios en la demanda por agua y su menor disponibilidad colocan a la agricultura en una creciente competencia por ese recurso con otras actividades económicas y con los requerimientos para consumo humano. Esto implica un doble desafío: utilizar el agua de modo más eficiente y conservar su calidad. (IICA, 2015, p. 20)

El correcto aprovechamiento de los recursos hídricos es un desafío fundamental en regiones áridas y semiáridas como el estado de Chihuahua, donde la disponibilidad de agua es limitada y la presión sobre las fuentes existentes continúa en aumento. En este sentido, es necesario analizar el contexto hidrogeológico de la región para comprender la dinámica de uso y conservación del agua, lo que permitirá establecer estrategias adecuadas para su gestión sostenible (Hoekstra & Mekonnen, 2012).

2.1.3 Escasez de agua y estrés hídrico

La problemática de la escasez hídrica se ha convertido en uno de los principales retos de la gestión de los recursos naturales. Este fenómeno no solo refleja un desequilibrio entre oferta y demanda, sino que también genera repercusiones sociales, económicas y ambientales de gran magnitud. “La escasez de agua tiene lugar cuando la demanda supera el suministro de agua dulce en un área determinada” (FAO, 2013).

La creciente escasez de agua dulce representa un riesgo significativo para la economía mundial y se ha consolidado como una problemática de escala global. Este fenómeno es impulsado por diversos factores, entre los que destacan el aumento de la demanda, el crecimiento demográfico, los efectos del cambio climático y una gestión ineficiente de los recursos hídricos (WWAP, 2015).

Según la FAO (2013), la escasez de agua puede entenderse a partir de tres dimensiones fundamentales: la insuficiencia física del recurso para satisfacer la demanda, el desarrollo limitado de infraestructura para su almacenamiento, distribución y acceso, y la debilidad institucional para garantizar servicios hídricos adecuados. En este sentido, Seckler *et al.* (1998) distinguen dos tipos principales de escasez: física y económica. La primera se refiere a la falta real de agua disponible para cubrir las demandas totales, incluidos los flujos ecológicos, y se manifiesta a través de la degradación ambiental, el descenso de los niveles freáticos y la distribución desigual del recurso. La escasez económica, por otro lado, ocurre cuando, a pesar de existir recursos hídricos suficientes, su acceso está limitado por la falta de infraestructura, capacidad institucional o técnica, lo cual impide satisfacer las necesidades básicas de la población y los sectores productivos.

La escasez de agua se evidencia en “la insatisfacción total o parcial de la demanda expresada, la competición económica por la calidad y la cantidad del agua, los conflictos entre usuarios, el agotamiento irreversible de las aguas

subterráneas y las consecuencias negativas para el medio ambiente” (FAO, 2013).

De todos los sectores productivos, la agricultura es el más expuesto a los efectos de la escasez hídrica; sin embargo, al mismo tiempo posee un alto potencial de adaptación mediante la incorporación de prácticas más eficientes en el uso del recurso. En este escenario, la FAO (2023) señala que la agricultura continuará siendo el principal usuario de agua en numerosos países, por lo que su papel debe considerarse dentro de un marco de discusión que permita evaluar sus impactos, la legitimidad de su asignación y las respuestas más adecuadas de manejo frente a un escenario de creciente escasez

El sector agrícola depende directamente de la disponibilidad de agua para su funcionamiento, a medida que la intensidad de la producción agrícola aumenta, también lo hace la extracción de agua de fuentes superficiales y subterráneas, lo que reduce la disponibilidad del recurso para otros sectores, como el urbano, el industrial y el ambiental. En contextos de escasez hídrica, ya sea por la sobreexplotación de fuentes o por fenómenos naturales como sequías, la producción agrícola se ve gravemente afectada. Esta situación pone en riesgo la estabilidad de los medios de vida rurales y compromete la seguridad alimentaria (FAO, 2013).

De acuerdo con Falkenmark & Widstrand (1992), uno de los indicadores más ampliamente utilizados para evaluar la escasez de agua a nivel nacional es la disponibilidad de agua dulce renovable per cápita. Este indicador se fundamenta en el volumen anual de agua renovable disponible por habitante y permite establecer umbrales cuantitativos que clasifican los distintos niveles de estrés hídrico que puede enfrentar una población, como se presenta en el Cuadro 1.

Esta metodología básica para evaluar la escasez de agua se sustenta, principalmente, en estimaciones del número de personas que puede vivir razonablemente con una determinada unidad de recursos hídricos (Falkenmark, 1984).

Cuadro 1. Definiciones convencionales de niveles de estrés hídrico

Agua dulce renovable anual (m³/pers/año)	Nivel de estrés hídrico
<500	Escasez absoluta de agua
500 – 1000	Escasez crónica de agua
1 000 – 1700	Estrés hídrico
> 1700	Estrés hídrico localizado

Fuente: Elaboración propia con datos de Falkenmark & Widstrand, 1992).

Este enfoque ha sido ampliamente utilizado debido a su simplicidad y utilidad para comparaciones internacionales, aunque también ha sido criticado por no considerar la calidad del agua, la distribución espacial o la eficiencia en su uso (Rijsberman, 2006).

El estrés hídrico, de acuerdo con la ONU (2023), se refiere a la proporción de agua dulce extraída en relación con la cantidad de recursos hídricos renovables disponibles, considerando además las necesidades ambientales del recurso. Es decir, mide el grado de presión que ejercen los principales sectores económicos sobre la disponibilidad de agua dulce.

Por su parte, Secretaría del Medio Ambiente (SEDEMA, 2023), define el estrés hídrico como una situación en la que la demanda de agua supera la cantidad disponible durante un período determinado, o cuando su uso se ve limitado por su baja calidad. Según esta institución, se estima que para el año 2025 alrededor de 1,900 millones de personas vivirán en países o regiones con escasez absoluta de agua, y hasta dos tercios de la población mundial podrían experimentar condiciones de estrés hídrico

El estrés hídrico es una problemática compleja que surge de la interacción entre factores naturales y actividades humanas. Su relación con la escasez del agua es directa, ya que el incremento en la demanda y la reducción en la disponibilidad generan una competencia creciente por el recurso. (IPCC, 2014). Esta situación representa una amenaza para la seguridad hídrica global,

afectando tanto la calidad de vida de las personas como la productividad de los ecosistemas y sectores económicos dependientes del agua.

En el caso de México, la situación es preocupante si se analiza bajo esta perspectiva. De acuerdo con estimaciones de la CONAGUA (2022), el volumen anual de agua renovable per cápita en el país disminuyó drásticamente en las últimas décadas, pasando de más de 10,000 m³/hab/año en 1950 a menos de 3,700 m³/hab/año en la actualidad, y se proyecta que podría descender por debajo de los 3,000 m³/hab/año para 2030. Si bien esto ubica al país en una situación aún fuera de la escasez crítica, muchas regiones especialmente en el norte y centro del país ya enfrentan niveles severos de estrés hídrico.

2.1.4 Agua renovable en México

Se usa el concepto de agua renovable para conocer la cantidad máxima que es factible explotar anualmente en una región sin alterar el ecosistema. El volumen de aguas renovables está determinado por la “diferencia entre los flujos de entrada (precipitación anual, importaciones de agua, escurrimiento superficial y recarga anual de los acuíferos) y los flujos de salida (evapotranspiración y exportaciones de agua) dentro de un sistema hidrológico” (CONAGUA, 2022).

Según datos correspondientes a los años 2021 y 2022, México recibe anualmente alrededor de 1,464,734 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. De este total, se estima que el 71.7 % se evapotranspira y retorna a la atmósfera, el 22 % fluye por ríos y arroyos, y únicamente el 6.3% se infiltra al subsuelo, contribuyendo a la recarga de los acuíferos. Con base en estas cifras, el volumen de agua renovable per cápita en el país se estima en 3,569 m³ por habitante por año. (CONAGUA, 2024a)

La disponibilidad de agua renovable, la distribución de la población y la contribución al PIB varían significativamente entre regiones. Según la CONAGUA (2022), al agrupar las regiones hidrológico-administrativas V, X, XI y XII, ubicadas en el sureste de México, se observa un claro contraste con el resto del país. Estas regiones concentran el 68% del agua renovable, albergan el 23% de la población y generan el 18% del PIB nacional. Por otro lado, las

regiones del norte, centro y noroeste cuentan con solo el 32% del agua renovable, pero concentran el 77% de la población y aportan el 82% del PIB nacional, como se muestra en la figura 11. Este desequilibrio resalta la disparidad en la disponibilidad y demanda del recurso hídrico en el país.

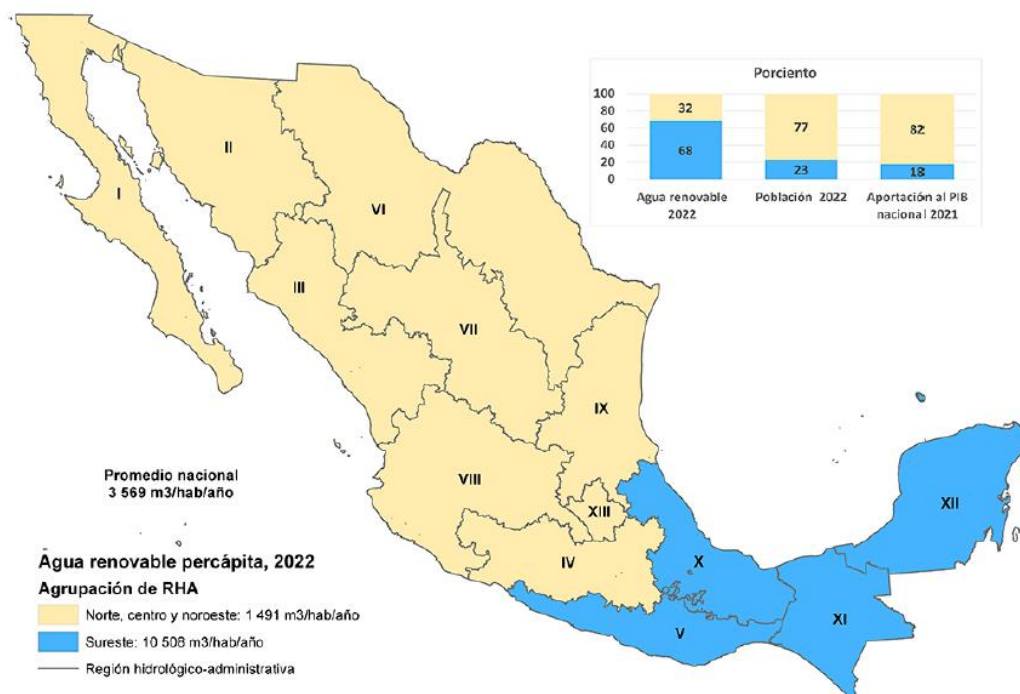


Figura 11. Contraste regional entre agua renovable y desarrollo

Fuente: CONAGUA, 2020

En conjunto, la combinación de cuencas cerradas, variabilidad climática, alta dependencia de acuíferos y creciente presión sobre los recursos hídricos subraya la necesidad de adoptar enfoques integrales de gestión del agua, considerando tanto la disponibilidad física como la sostenibilidad ambiental del recurso. Esta situación resulta particularmente relevante para actividades como la ganadería estabulada, cuyo consumo de agua directa e indirecta requiere una planificación cuidadosa frente a escenarios de estrés hídrico creciente en el norte del país.

2.1.5 Tarifas del agua en México

Garantizar el acceso continuo al agua potable es esencial para el bienestar humano y el desarrollo social. En este ámbito, el costo por el acceso al agua

debe equilibrar consideraciones económicas, sociales y políticas. Si bien tarifas elevadas pueden afectar negativamente a los sectores más vulnerables de la población, tarifas demasiado bajas comprometen la sostenibilidad financiera del sistema, afectando la calidad y cobertura del servicio. (IMCO, 2023)

Es crucial que los criterios de definición tarifaria sean transparentes y promuevan tanto la equidad social como la responsabilidad ambiental, incentivando el uso eficiente del recurso. El establecimiento de tarifas adecuadas busca asegurar la viabilidad financiera de los organismos operadores, permitiendo el mantenimiento, operación y mejora continua de la infraestructura y los servicios asociados. (CONAGUA, 2022)

En México, las tarifas del agua no están reguladas a nivel nacional de manera homogénea. En cambio, su fijación depende de organismos operadores municipales o estatales, lo cual responde a la política de descentralización del agua. (IMCO, 2023). Esto significa que cada municipio o entidad federativa establece sus propias tarifas, con base en costos de operación, mantenimiento, infraestructura, demanda y políticas públicas locales. En muchos casos, las tarifas se aprueban por cabildos municipales o congresos estatales, en conjunto con propuestas de las comisiones de agua locales.

Las tarifas de agua varían según el tipo de usuario (residencial, comercial o industrial) y, por lo general, se determinan en función del volumen de consumo. Sin embargo, existe una notable disparidad en las categorías y rangos tarifarios entre las distintas entidades federativas, lo que dificulta la comparación de los costos reales del suministro de agua potable a nivel nacional. Además, en algunas entidades la recaudación por el cobro de agua potable no es proporcional al gasto en mantenimiento y mejora de infraestructura. (IMCO, 2023) Este desequilibrio es evidente en lugares como Jalisco, Guanajuato, Chihuahua y Tamaulipas. Como lo muestra la figura 12.



Figura 12. Tarifas domésticas mínimas por entidad federativa en 2023

Fuente: IMCO, 2023

Cabe destacar que las tarifas actuales no reflejan el costo total del suministro. Los gastos no cubiertos por las mismas se compensan con los subsidios que otorga el Gobierno Federal. Esta política responde a objetivos sociales (garantizar que todos los ciudadanos puedan acceder a agua potable a precios asequibles), económicos (el subsidio agrícola puede impactar el precio final de la producción agropecuaria) y políticos (elevar las tarifas del agua puede tener implicaciones electorales). Sin embargo, el esquema actual de subsidios ha resultado ineficiente, ya que tiende a beneficiar desproporcionadamente a los grandes consumidores (IMCO; 2023).

Particularmente para el estado de Chihuahua, la Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS, 2023) estableció en su tarifario para 2024, publicado en el Periódico Oficial del Estado (POE), que los usuarios deberán cubrir al menos una tarifa mínima de consumo. Las tarifas de servicio varían según el tipo de usuario:

- Uso doméstico: consumo mínimo de 10 m³/mes, con un costo de \$19.56 por m³.

- Uso comercial: consumo mínimo de 20 m³/mes, con un costo de \$20.55 por m³.
- Uso industrial: consumo mínimo de 20-30 m³/mes, con un costo de \$32.78 por m³.
- Agua residual tratada (uso principalmente para riego): consumo mínimo de 20 m³/mes, con un costo de \$8.57 por m³.
- Agua potable acarreada en pipa: costo de \$101.92 pesos por metro cúbico.

En cuanto a las tarifas del agua destinada al sector agrícola en Guerrero, Chihuahua, la Asociación Civil de Usuarios del Distrito de Riego 083 Papigochi estableció para el ciclo agrícola 2024-2025 las siguientes tarifas:

- Cuota de riego de praderas: \$1,897.00 por hectárea/riego.
- Cuota de riego de conservación: \$350.00 por ha/riego

2.1.6 Economía del agua y costos de suministro de agua

La economía del agua busca establecer criterios para asignar eficientemente un recurso escaso entre múltiples usuarios y sectores con demandas diversas. Este campo integra principios de la economía del bienestar, la teoría de la eficiencia y la gestión ambiental, con el propósito de maximizar el bienestar social a través del uso racional del recurso. Existen distintas aproximaciones teóricas; sin embargo, Griffin (2006) desarrolla un enfoque particularmente influyente que vincula los costos de suministro con la eficiencia económica, siendo especialmente relevante para el diseño de políticas tarifarias y la gestión sostenible del agua.

Según Griffin (2006), la planificación económica del recurso hídrico parte del reconocimiento de que el agua no es gratuita ni homogénea, sino un bien con costos de extracción, tratamiento, almacenamiento y distribución que deben ser considerados para lograr una asignación socialmente óptima. La eficiencia económica en el uso del agua se alcanza cuando el beneficio marginal que los usuarios obtienen del recurso es igual a su costo marginal de suministro.

Este enfoque permite evaluar decisiones de política hídrica basadas en la maximización del bienestar social, reconociendo que cada unidad de agua tiene un valor diferente según el uso y el contexto en que se emplea. Por tanto, la eficiencia no se refiere solo al uso técnico del recurso, sino a su utilización económica óptima, donde los costos y beneficios sociales se equilibran.

El costo de suministrar agua incluye más que la simple captación del recurso. Griffin (2006) explica que los proveedores de agua enfrentan gastos significativos en infraestructura, energía, mantenimiento, administración y gestión. Estos costos varían según el tipo de usuario y el nivel de procesamiento requerido. Así, el costo total de suministro, representado por la función $C(W)$, depende de la cantidad de agua entregada y de las tecnologías empleadas.

La función de costo marginal (MC) derivada de la función de costo total es clave para entender la oferta de agua. A medida que se incrementa la cantidad suministrada, los costos marginales inicialmente disminuyen debido a economías de escala, pero posteriormente aumentan cuando se alcanzan límites de capacidad o escasez del recurso natural. En este sentido, la gestión eficiente del agua requiere que los proveedores operen en su función de costo mínimo y reconozcan los costos de oportunidad del recurso (Griffin, 2006). Ignorar estos costos conduce a una asignación ineficiente, donde el agua se destina a usos de bajo valor económico simplemente porque no tiene un precio que refleje su verdadera escasez.

El valor económico del agua se origina en su escasez y en los costos asociados a su disponibilidad. Cuando los precios o tarifas no reflejan los costos reales de suministro, incluyendo el tratamiento y la distribución, se genera una asignación ineficiente y se promueve un consumo excesivo. Griffin (2006) argumenta que una política tarifaria eficiente debe incorporar tanto los costos financieros del servicio como los costos ambientales y de oportunidad, a fin de incentivar un uso racional del recurso. Este principio es particularmente relevante en regiones áridas o semiáridas, donde el costo marginal del agua se incrementa

rápida ante la sobreexplotación de acuíferos o fuentes superficiales. De este modo, la valoración económica del agua no solo cumple una función recaudatoria, sino también reguladora, orientada a la sostenibilidad del recurso.

El concepto de costo de oportunidad constituye uno de los pilares de la economía del agua. Cada unidad del recurso destinada a un uso implica renunciar a otros usos posibles, por lo que el costo de oportunidad representa el valor del mejor uso alternativo. Reconocer estos costos es indispensable para evitar asignaciones ineficientes y promover decisiones informadas, tanto a nivel de productor como de política pública. Una gestión eficiente del agua, en consecuencia, no solo busca minimizar costos financieros, sino también internalizar los costos de oportunidad y ambientales, garantizando un uso equitativo y sostenible del recurso en el largo plazo (Griffin, 2006).

En concordancia con este planteamiento, Hanemann (2005) también subraya la importancia de considerar la escasez y los costos marginales en la valoración del agua, mientras que Rogers, Bhatia & Huber (2002) proponen que el precio del agua refleje los costos totales (financieros, ambientales y de escasez) para promover una gestión equitativa y eficiente del recurso. Estas perspectivas complementan la visión de Griffin, reforzando la idea de que la valoración económica adecuada es fundamental para una asignación sostenible del agua.

2.2 Huella Hídrica

Luchar contra el cambio climático es una preocupación global, y por ello la mayoría de los países encaminan sus políticas a favor de la protección y prevención, reduciendo las emisiones. Sin embargo, y a pesar de la dimensión que ha adquirido en las últimas décadas, este impacto ambiental no es la única amenaza de nuestro planeta. De hecho, para determinar actividades o zonas geográficas existen otras afecciones que son tan relevantes, e incluso más, que el cambio climático. Es el caso del agua, un recurso natural esencial que en algunas zonas del planeta hay que poner especial atención en él. Para poder realizar una correcta gestión del agua es fundamental conocer con

minuciosidad cuánta agua es necesaria para la producción de un producto. (Hoekstra *et al.*, 2011)

En el proceso de producción de bienes y servicios, el agua es un recurso indispensable que, aunque rara vez se contabiliza en su totalidad, está presente en cada etapa, desde el inicio hasta el final de la cadena productiva. Diversas metodologías han sido desarrolladas para analizar la demanda de recursos y el impacto ambiental derivado de las actividades humanas, entre los que destacan la huella ecológica (Rees, 1992), la huella de carbono, el agua virtual (Allan, 1998) y la huella hídrica (Hoekstra, 2003).

El concepto de huella ecológica, desarrollado por Rees & Wackernagel (1996), es una herramienta que mide el impacto ambiental de las actividades humanas al comparar el consumo de recursos naturales con la capacidad de la Tierra para regenerarlos y absorber los desechos.

La metodología del “Agua Virtual” establecida por Allan (1998), se define como “el agua utilizada en la producción de un bien agrícola o industrial, que puede ser ‘exportada’ o ‘importada’ indirectamente a través del comercio de productos.” Este enfoque permite a los países con escasez hídrica acceder a recursos hídricos de manera sostenible, al importar bienes que requieren grandes cantidades de agua para su producción.

Hoekstra (2003), introdujo el concepto de huella hídrica, definiéndola como “el indicador que mide el volumen total de agua dulce utilizado directa e indirectamente para producir bienes y servicios consumidos por una persona, comunidad o industria”. Este concepto permite evaluar el impacto humano sobre los recursos hídricos.

La evaluación de la huella hídrica comprende un conjunto de actividades orientadas a distintos propósitos. En primer lugar, busca cuantificar y localizar la huella hídrica asociada a un proceso, producto, productor o consumidor, así como determinarla en el espacio y el tiempo dentro de un área geográfica específica. Asimismo, permite analizar su sostenibilidad desde una perspectiva

ambiental, social y económica, considerando los impactos y las implicaciones que conlleva. Finalmente, la evaluación de la huella hídrica proporciona las bases necesarias para formular una estrategia de respuesta que contribuya a una gestión más eficiente y responsable del recurso. (Hoekstra *et al.*, 2011)

La huella hídrica total se calcula sumando las huellas hídricas verde, azul y gris, las cuales se describen a continuación

- La huella hídrica verde: “Corresponde al agua de lluvia almacenada en el suelo y utilizada por las plantas a través de la evapotranspiración durante el proceso productivo, sin recurrir a fuentes hídricas externas” (Hoekstra *et al.*, 2011).
- La huella hídrica azul: “Es el volumen de agua dulce extraída de fuentes superficiales o subterráneas que se consume durante la producción de bienes o servicios, ya sea por evaporación, incorporación al producto o traslado a otro sistema” (Hoekstra *et al.*, 2011).
- La huella hídrica gris: “Representa el volumen de agua requerido para diluir los contaminantes generados en la producción hasta cumplir con los estándares de calidad ambiental establecidos” (Hoekstra *et al.*, 2011).

De esta manera, el cálculo de la huella hídrica constituye una herramienta analítica que permite cuantificar y comprender el uso total de agua dulce asociado a distintas actividades y sectores productivos. Este enfoque considera tanto los usos directos, como el agua empleada en los procesos de producción, como los usos indirectos, que corresponden al agua incorporada de forma no visible en la elaboración de bienes y servicios.

El objetivo de la evaluación de la huella hídrica es analizar cómo las actividades humanas o los productores específicos se relacionan con los problemas de la escasez de agua y de su contaminación y estudiar cómo tanto las actividades como los productos pueden llegar a ser más sostenibles desde un punto de vista hídrico. (Hoekstra *et al.*, 2011, p. 30)

Con el propósito de fortalecer la comparabilidad y el rigor metodológico, en 2014 la Organización Internacional de Normalización (ISO) publicó la norma ISO 14046: Gestión ambiental — Huella de agua — Principios, requisitos y directrices, la cual establece los principios, requisitos y directrices para la evaluación de la huella hídrica dentro del marco del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). Esta norma no solo cuantifica el uso del agua, sino que considera los impactos potenciales asociados a su extracción, consumo y degradación, contribuyendo a mejorar la eficiencia hídrica en los procesos productivos y a respaldar la toma de decisiones ambientales basadas en evidencia (ISO, 2014).

La ISO 14046 está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 6: Agua limpia y saneamiento, promoviendo prácticas que mejoren la disponibilidad de agua y reduzcan impactos ambientales en comunidades y ecosistemas (ISO, 2025). Más allá de medir volúmenes de agua, esta norma permite evaluar los impactos potenciales asociados al consumo y degradación del recurso, incluyendo aspectos como el estrés hídrico o la disponibilidad limitada de agua en determinadas cuencas (ISO, 2014).

Mateo *et al.* (2019), señalan que la huella hídrica refleja la apropiación humana de los recursos hídricos. Permite visualizar el uso oculto del agua en los alimentos y productos, ayudando a comprender los efectos del consumo y el comercio, frente a la disponibilidad de agua.

El cálculo de la huella hídrica de los productos típicos de cada región puede contribuir a una gestión más eficiente de los recursos hídricos locales. En este sentido, la propuesta de Hoekstra *et al.* (2011) surge como una iniciativa de alcance mundial que proporciona un marco metodológico estandarizado para evaluar este indicador.

Esta herramienta integral busca apoyar la gestión sostenible del agua al proporcionar información detallada sobre su uso, consumo y contaminación en diferentes niveles: individual, comunitario y productivo, incluyendo los sectores agrícola, industrial y de servicios. Asimismo, promueve un uso más responsable del recurso, impulsa la transparencia en su gestión y apoya la adopción de

estrategias sostenibles orientadas a mitigar los impactos ambientales y sociales derivados de su aprovechamiento. (Hoekstra *et al.*, 2011)

Hoekstra *et al.* (2011) proponen las fases necesarias para evaluar la huella hídrica, las cuales se presentan en la Figura 13.

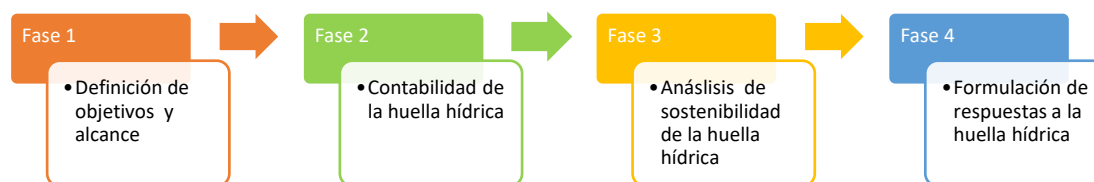


Figura 13. Cuatro fases diferentes de la evaluación de la huella hídrica.

Fuente: Hoekstra *et al.*, 2011

La huella hídrica se cuantifica como el volumen de agua utilizado por unidad de producto, generalmente expresado en metros cúbicos por tonelada (m^3/t) o litros por kilogramo (L/kg), reflejando el consumo total de agua asociado a su producción (Hoekstra *et al.*, 2011)

La estructura económica de cada país está determinada por sus actividades productivas, las cuales varían según su enfoque: algunos tienen una fuerte orientación agropecuaria, otros destacan en el sector industrial y algunos más se especializan en servicios. La forma en que cada sector utiliza el agua define la huella hídrica de producción de un país, la cual mide el volumen de agua empleado tanto para satisfacer el consumo interno como para producir bienes destinados a la exportación. A nivel global, se estima que la huella hídrica anual es de $9,087 \text{ Gm}^3$, distribuida en un 74% de huella verde, un 11% de huella azul y un 15% de huella gris. Además, el 92% de este volumen está asociado a actividades agrícolas (AgroDer, 2012).

Según el IICA (2017), la evaluación de la huella hídrica implica un análisis integral de sostenibilidad que abarca sus tres dimensiones: ambiental, económica y social. Este enfoque facilita la creación de estrategias realistas que toman en cuenta tanto las necesidades humanas como las del medio ambiente, de manera participativa y con perspectiva de tiempo.

Asociado a lo anterior Mekonnen & Hoekstra (2011), mencionan que la evaluación de la huella hídrica de productos de consumo común es una herramienta que ayuda a los usuarios a comprender los volúmenes de agua utilizados en su producción. Por ejemplo, al analizar la huella hídrica de alimentos como la carne, los cereales o los lácteos, se revela que algunos productos requieren cantidades significativamente mayores de agua en comparación con otros.

2.2.1 Huella hídrica del sector agrícola y pecuario

La huella hídrica es un indicador clave dentro del análisis de la asignación y el uso sostenible, justo y eficiente de los recursos naturales. Para adoptar este enfoque en el estudio de la producción agrícola de un país, es fundamental considerar las condiciones socio-culturales, económicas y ambientales en las que se desarrolla la actividad. (Pérez, 2013)

Se estima que la producción de productos ganaderos es responsable del 27% de la huella hídrica mundial, mientras que el consumo doméstico de agua solo contribuye con un 4% (Bhagat *et al.*, 2020). Dado que la demanda de agua para la producción de carne se incrementa en paralelo al crecimiento poblacional, el sector ganadero ha intensificado el uso de recursos tanto renovables como no renovables para satisfacer dicha demanda. Sin embargo, esta expansión ha generado una mayor competencia con otros usuarios, sectores productivos y servicios ambientales, exacerbando los problemas de escasez hídrica en diversas regiones (Siwek *et al.*, 2021). Además de la escasez de agua, uno de los principales desafíos que enfrenta la ganadería es la gestión y disposición adecuada de los residuos generados de manera directa, ya que las heces y la orina pueden representar un riesgo significativo para el medio ambiente (Steinfeld *et al.*, 2009).

Mekonnen & Hoekstra (2011) analizaron los flujos de agua virtual a nivel global, incluyendo el caso de México. Según sus hallazgos, México es un importador neto de agua virtual, lo que significa que el volumen de agua virtual asociado a los productos que importa es mayor que el de los productos que exporta.

Entre 1996-2005, el país se ubicó como el segundo mayor importador neto a nivel mundial y el primero en América, considerando los sectores agrícola, pecuario e industrial. La mayor parte de esta huella hídrica externa proviene de Estados Unidos, Canadá, China y Brasil.

Mekonnen & Hoekstra (2010), identificaron que la carne de res posee la huella hídrica más alta entre los productos cárnicos, estimando que un kilogramo requiere alrededor de 15,400 litros de agua, desglosados en tres componentes principales: agua verde (86%); agua azul (6%) y agua gris (8%). Gran parte de este consumo se relaciona con la producción de forrajes y granos para el ganado, lo que resalta la necesidad de prácticas agrícolas más eficientes. La huella hídrica también varía según el sistema de producción y las condiciones agroecológicas de cada región.

Hoekstra (2012), señaló que los sistemas intensivos, que dependen de alimentos concentrados, tienden a ser más eficientes en el uso del agua, mientras que los sistemas extensivos dependen en mayor medida del agua verde (lluvia almacenada en el suelo). El autor también enfatizó la necesidad de adoptar prácticas más sostenibles en la producción ganadera y reducir el consumo de carne para aliviar la presión sobre los recursos hídricos globales.

Ríos *et al.* (2015), calcularon la huella hídrica de los cultivos forrajeros en el DR-017, empleando indicadores de productividad y eficiencia. Los resultados mostraron que, aunque estos cultivos ocuparon casi la mitad de la superficie agrícola y consumen la mayor parte del agua subterránea disponible, contribuyen solo a un tercio del valor bruto de la producción. Entre ellos, el maíz y el sorgo forrajero mostraron mayor eficiencia y menor huella hídrica azul, señalando una producción más sostenible desde el punto de vista hídrico.

La relevancia del sector ganadero en la contaminación y sobreexplotación del agua se relaciona con tres aspectos clave: (1) el consumo de agua para el ganado, los servicios de mantenimiento y la producción de alimentos; (2) la contaminación hídrica, derivada de los desechos animales, la elaboración de productos pecuarios y la producción de concentrados y forrajes; y (3) el uso del

suelo por el ganado y su efecto sobre el ciclo del agua, principalmente por la alteración de los flujos hídricos mediante sedimentación y la conversión del uso del terreno (Steinfeld *et al.*, 2009).

Ercin & Hoekstra (2014), proyectaron los cambios en la huella hídrica de producción y consumo hasta 2050, considerando factores como crecimiento poblacional, económico, patrones de producción y comercio, y avances tecnológicos. El estudio mostró las interdependencias globales de los recursos hídricos y destacó que, aunque la población aumente, la huella hídrica puede reducirse a niveles sostenibles si se modifican significativamente los patrones de consumo.

El enfoque metodológico propuesto por Mekonnen & Hoekstra (2012), plantea que la huella hídrica del ganado bovino como la suma de varios componentes: la HH indirecta vinculada al agua usada en la producción de su alimento, la HH directa del agua que ingieren y la HH asociada al agua utilizada en la granja para servicios como la limpieza de corrales. Este indicador puede estimarse para todo el ciclo de vida del animal o para períodos específicos.

AgroDer (2012), señala que la mayor parte de la huella hídrica verde de México se concentra principalmente en la agricultura (76%) y el pastoreo (24%), mientras que el agua azul proviene mayoritariamente del riego agrícola (85%) y solo en pequeña medida del sector industrial (1%). En cuanto al agua gris, la mitad se relaciona con la producción agrícola. En términos de consumo per cápita, México ocupa el lugar 49 a nivel mundial, con 1,978 m³ por persona al año, superior al promedio global de 1,385 m³.

Vázquez & Lambarri (2017) estimaron la huella hídrica azul de 26 cultivos en el Distrito de Riego 011, en Guanajuato, para 2014, diferenciando entre agua superficial y subterránea. La producción consumió un total de 287.39 hm³, de los cuales seis cultivos representaron el 96% del total, distribuyéndose el agua utilizada en 58% superficial y 42% subterránea.

Peñaloza *et al.* (2020) evaluaron la huella hídrica de tomatillo y cebolla en Atlixco, Puebla, considerando los ciclos agrícolas y las condiciones climáticas de 2017. Encontraron que la cebolla del ciclo primavera-verano presentó una huella hídrica mayor que la cebolla de otoño-invierno y el tomatillo, debido a variaciones estacionales y diferencias en los rendimientos, calculando los componentes verde, azul y gris según evapotranspiración y uso de fertilizantes.

Cereceres (2021) evaluó la huella hídrica de la producción de sotol en Chihuahua utilizando el programa Cropwat 8.0. Los resultados indicaron que esta producción depende casi en su totalidad del agua de lluvia, ya que la huella hídrica verde representó más del 99 % del total, mientras que las huellas azul y gris fueron marginales.

Botello *et al.* (2024) evaluaron la huella hídrica azul, verde y gris de 14 cultivos en el Distrito de Riego 011, en El Bajío, identificando aquellos con mayor potencial para mejorar la eficiencia en el uso del agua. Los cultivos con mayor huella hídrica promedio fueron cacahuete, frijol y nopal, mientras que hortalizas como lechuga, tomate de cáscara y zanahoria mostraron los valores más bajos. Aunque el maíz y el trigo representaron el 74% de la huella hídrica total del distrito, su aporte a la producción total fue relativamente menor, con 53% y 22%, respectivamente.

La implementación adopción de mejoras en las prácticas agrícolas, especialmente aquellas que aumentan los rendimientos y optimizan los sistemas de riego, puede reducir la huella hídrica de los cultivos y generar mayores beneficios económicos al aprovechar el agua de manera más eficiente. Asimismo, una gestión adecuada de fertilizantes y plaguicidas contribuye a disminuir significativamente la huella hídrica gris (Botello *et al.*, 2024).

Trujillo *et al.* (2022) calcularon la huella hídrica de la carne de bovino de raza Charoláis en producción estabulada en Ezequiel Montes, Querétaro, considerando únicamente los componentes azul y verde. El valor estimado fue de 2,972.4 litros por kilogramo, sumando el agua de los alimentos consumidos y la ingerida por los animales. Las diferencias con otros estudios se atribuyen a

factores como las condiciones locales, las prácticas de cultivo, la dieta y raza del ganado, así como la ganancia de peso y el rendimiento en canal.

Garay *et al.* (2022) evaluaron la huella hídrica de 12 ingenios azucareros en la cuenca Papaloapan, encontrando valores entre 239 y 328 m³ t⁻¹, siendo la caña de azúcar más demandante que otros cultivos del país. La variación se relaciona con el rendimiento por hectárea y la evapotranspiración anual. Además, se observó que los ingenios con mayor superficie presentan menor control sobre los procesos productivos, sugiriendo que mejorar la productividad y las prácticas de manejo podría reducir la huella hídrica en la región.

Esquivel & Salgado (2020) compararon la huella hídrica de once productos de origen animal en México y Estados Unidos, encontrando que, a pesar de las diferencias demográficas, sociales y económicas entre ambos países, los valores de huella hídrica fueron similares para todos los productos analizados, incluidos lácteos, huevo y distintas carnes.

La cuantificación de la huella hídrica no solo ayuda la preservación del agua para generaciones futuras, sino que también asegura la viabilidad económica de los sistemas productivos. Ramírez *et al.* (2015) evaluaron los impactos ambientales y económicos de la huella hídrica en la producción de ganado lechero en la Comarca Lagunera. El estudio mostró que predominó la huella hídrica azul, con un consumo anual superior a 3,500 millones de m³, representando uno de los niveles más altos para la producción pecuaria.

Rodrigues & Dziedzic (2021) evaluaron la huella hídrica de la carne bovina en la región amazónica de Brasil y encontraron valores inferiores al promedio mundial, indicando una mayor eficiencia en el uso del agua. Esta eficiencia se atribuye a factores como los patrones de precipitación, la selección de pastos para la alimentación y el manejo adecuado de los mismos.

El análisis de la huella hídrica es una herramienta clave para identificar problemáticas en la gestión del agua, evaluar su calidad y definir responsabilidades entre los distintos actores involucrados. Arévalo *et al.* (2013)

realizaron un estudio sobre la HH del sector agrícola colombiano, con el objetivo de promover la gestión sostenible del agua entre los principales sectores involucrados: sociedad civil, sector privado y entidades gubernamentales. Su investigación cuantificó los impactos hídricos de las actividades económicas y sociales, demostrando sus efectos significativos en: (1) la disponibilidad del recurso hídrico, (2) su conservación, y (3) el desarrollo socioeconómico del país. Los resultados destacaron el papel central del agua como factor determinante para el crecimiento económico y el bienestar social.

El arroz es uno de los principales cultivos que sustentan la alimentación a nivel mundial; sin embargo, es también uno de los más demandantes en términos de huella hídrica. Fonseca *et al.* (2012) evaluaron la huella hídrica del cultivo de arroz en Perú, aplicando la metodología de la Water Footprint Network (WFN) con datos de 71 estaciones hidrometeorológicas. Los resultados mostraron que el 84% de la huella hídrica corresponde al uso de agua azul, 9% a agua verde y 7% a agua gris, reflejando la alta dependencia hídrica del arroz en sistemas de riego tradicionales.

Rodríguez *et al.* (2009) evaluaron la huella hidrológica agrícola en España, destacando que la agricultura representa más del 80 % del uso de agua del país, principalmente por los cereales y cultivos industriales. Además, señalaron que más de la mitad del agua utilizada para satisfacer la demanda de bienes y servicios proviene del exterior, evidenciando la dependencia de recursos hídricos foráneos.

La agricultura, particularmente la de regadío, atraviesa actualmente un proceso de transformación acelerado, enfrentando tanto desafíos históricos como problemáticas emergentes. En este escenario, los agricultores deben adaptarse a un mundo donde el comercio y la globalización incrementan la interdependencia entre producción y consumo, mientras los avances tecnológicos potencian la productividad agrícola y transforman rápidamente los sistemas de producción y los patrones de consumo (FAO, 2013).

La globalización ha intensificado el comercio agropecuario, implicando el intercambio de agua virtual, es decir, el agua contenida en los productos trasladados entre regiones. Así, las decisiones de consumo en un país pueden afectar la disponibilidad hídrica en otros, reforzando la importancia de considerar la huella hídrica como un indicador crítico en los mercados agrícolas internacionales (Chapagain & Hoekstra, 2004).

La huella hídrica (HH) de los productos agrícolas y pecuarios presenta variaciones importantes entre regiones y países, influida por factores como el clima, la disponibilidad y tipo de agua empleada, las prácticas de producción y la eficiencia en su uso. Estas diferencias reflejan tanto las características ecológicas de cada región como el nivel tecnológico y las políticas de gestión hídrica adoptadas en cada país (Mekonnen & Hoekstra, 2012).

2.2.2 Huella hídrica y políticas públicas

Debido a su carácter multifuncional, el manejo del agua no solo requiere considerar los aspectos técnicos y económicos, sino también los sociales, institucionales y ambientales que permiten su uso justo y adecuado. En este sentido, diversas instituciones destacan la necesidad de implementar políticas integrales que aborden múltiples dimensiones del recurso.

El IICA (2015) señala la importancia de desarrollar estrategias que incluyan la capacitación de los recursos humanos, la infraestructura, la investigación y el desarrollo tecnológico, la protección de cuencas y acuíferos, así como incentivos para la innovación y el acceso a financiamiento.

La huella hídrica es un indicador multidimensional que no solo cuantifica el volumen de agua utilizado, sino que también distingue entre diferentes tipos de agua (verde, azul y gris) y evalúa las dimensiones espaciales y temporales del uso del agua. Esto la convierte en una herramienta poderosa para comprender la sostenibilidad de las prácticas de gestión del agua e identificar oportunidades de mejora (Aldaya *et al.*, 2010).

En México, la Ley de Aguas Nacionales (LAN), promulgada en 1992, incorporó el concepto de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como un eje estratégico. Este marco legal reconoce de manera explícita el desarrollo sostenible como su objetivo central, estableciendo que las actividades relacionadas con la gestión del agua deben conducirse bajo los principios de este enfoque integral, con el fin de armonizar las necesidades sociales, económicas y ambientales.

De acuerdo con la CONAGUA (2014), la evolución de la política hídrica en México puede dividirse en tres etapas principales. Durante la primera, a principios del siglo XX, las acciones se centraron en la oferta de agua, destacándose la construcción de grandes obras de infraestructura. La segunda etapa, que abarca el periodo 1980-1990, orientó la política hacia la gestión de la demanda y la descentralización, incluyendo la creación de la CONAGUA y la transferencia de responsabilidades a los municipios en la provisión de servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Finalmente, desde el inicio del presente siglo, la tercera etapa ha priorizado la sostenibilidad, fomentando el tratamiento de aguas residuales, el reúso del agua y una mejor administración de los recursos hídricos nacionales. Es en este entorno, donde la evaluación de la huella hídrica se consolida como un indicador de gran relevancia para la gestión integral del agua.

El análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica, junto con el diseño de medidas concretas en situaciones y lugares estratégicos, constituye una estrategia efectiva para afrontar los desafíos asociados a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) y contribuir al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Para alcanzar estos objetivos, resulta esencial incorporar estos conceptos y prácticas en las políticas públicas, no solo en el ámbito hídrico, sino también en los sectores ambiental, agrícola y comercial. Dichas políticas deben estar diseñadas con un alto grado de coherencia y coordinación, de manera que el comercio internacional promueva un uso más eficiente y sostenible del agua a nivel global.

El concepto de huella hídrica ha comenzado a incorporarse en el ámbito público, reflejándose tanto en las estadísticas hídricas de México como en diversas iniciativas impulsadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para fomentar el uso eficiente del recurso. Un ejemplo relevante es la publicación, en 2016, de las Reglas en el Diario Oficial de la Federación, que establecen la metodología para determinar el volumen de uso eficiente de las aguas nacionales e incluyen la evaluación de la huella hídrica como parte de sus lineamientos (Vázquez & Lambarri, 2017).

El cálculo de la huella hídrica se presenta como una herramienta eficaz para informar a los tomadores de decisiones en el sector, así como a las organizaciones gubernamentales y no gubernamentales, sobre los posibles impactos ambientales relacionados con el uso del agua. Esta metodología es útil para diversos fines, como la planificación de estrategias, la formulación de políticas públicas, el diseño o rediseño de productos y procesos, y la toma de decisiones sobre inversiones de recursos. (Hoekstra *et al.*, 2011)

Los importantes desafíos relacionados con la gestión del agua en México y a nivel global exigen una revisión profunda de las políticas públicas, así como de los modelos de producción y consumo actuales, los cuales distan de ser sostenibles. Así pues, la huella hídrica emerge como una herramienta que ofrece una perspectiva innovadora, complementando otros indicadores para orientar la formulación de políticas públicas y facilitar la toma de decisiones, ya sea en el ámbito gubernamental, empresarial, social o individual. Su aplicación puede contribuir a promover una gestión del agua dulce que sea más sostenible, eficiente y equitativa. (Vázquez & Lambarri, 2017)

La importancia de calcular la huella hídrica ha trascendido hacia el ámbito de las políticas públicas y las estrategias de conservación, evidenciándose en la adopción de metodologías de evaluación por parte de organizaciones internacionales, como la Water Footprint Network (Hoekstra *et al.*, 2011).

En su informe, Vázquez & Lambarri (2017), destacan la importancia de diseñar y articular políticas públicas más efectivas y coherentes, no solo en el ámbito

hídrico, sino también en los sectores ambiental, agrícola, comercial y energético. Asimismo, concluyen, que, al integrar la huella hídrica en la toma de decisiones, se pueden desarrollar estrategias que equilibren las demandas competitivas del agua, fomenten la eficiencia en su uso y garanticen la seguridad hídrica y alimentaria a largo plazo. Además, su aplicación facilita la coordinación entre diferentes sectores y niveles de gobierno, promoviendo una gestión integrada y adaptativa que responda a los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua.

2.2.3 Huella hídrica y valoración económica del agua

El valor económico de un bien o servicio no suele coincidir con su precio de mercado. Esta diferencia es aún más evidente en el caso de los bienes y servicios ambientales, como los recursos naturales, en particular el agua, que con frecuencia presenta características propias de los bienes públicos. Esta distinción fue planteada desde hace tiempo por Adam Smith y ha sido retomada por diversos economistas, entre ellos Nicholson (2009) y Hanemann (2005) (Garay *et al.*, 2022).

La Declaración de Dublín de 1992 establece varios principios fundamentales. Uno de los más relevantes para esta investigación es el Principio No. 4, que sostiene que “el agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe reconocerse como un bien económico” (WMO, 1992). El agua es un recurso vital, escaso y esencial para la vida humana, los ecosistemas y la producción de bienes y servicios. Sin embargo, a pesar de su importancia, su valor no siempre es reflejado de manera adecuada en las decisiones económicas y políticas. “El agua tiene un valor económico porque es escasa, y su uso productivo debe basarse en criterios de eficiencia, sostenibilidad y equidad” (Hoekstra *et al.*, 2011).

Según Hanemann (2005), el agua posee características que dificultan su valoración: es un bien común, de acceso colectivo, con alta variabilidad espacial y temporal, y con múltiples funciones económicas, sociales y ecológicas. No obstante, estas complejidades no deben ser una excusa para ignorar su valor

económico: “Valorar el agua económicamente no significa ponerle precio como mercancía, sino reconocer su escasez relativa y su importancia para el bienestar social y ambiental” (Hanemann, 2005).

Desde una perspectiva microeconómica, Nicholson (2007) señala que el valor económico de un recurso natural como el agua puede interpretarse a través del costo de oportunidad, es decir, el valor del mejor uso alternativo que se sacrifica al asignar el recurso a una actividad determinada. En el caso de la agricultura, esto implica comparar el uso del agua en distintos cultivos, sistemas productivos o regiones.

Asimismo, Ríos (2015) enfatiza que la valoración del agua permite identificar usos ineficientes, diseñar instrumentos económicos (como tarifas o subsidios) y fomentar la equidad en el acceso, especialmente en zonas rurales donde el agua suele estar subvalorada o no contabilizada. “La valoración económica del agua puede ser una herramienta de política pública para corregir distorsiones, reducir externalidades y orientar decisiones hacia el uso sustentable del recurso” (Ríos, 2015).

El agua posee una doble naturaleza económica, ya que puede comportarse tanto como un bien privado como un bien público. Cuando se utiliza de manera individual (por ejemplo, en actividades domésticas, industriales o agrícolas) actúa como un bien privado, dado que su consumo es excluyente y rival. Sin embargo, cuando permanece en su entorno natural y se destina a usos como la navegación, la recreación, el paisaje o el mantenimiento de ecosistemas acuáticos, adquiere características de bien público, al ser accesible para todos sin reducir su disponibilidad. Incluso, en infraestructuras como los embalses, aunque el agua almacenada puede considerarse un bien privado, la capacidad de regulación del sistema hidráulico puede representar un bien público. Esta complejidad diferencia al agua de otros bienes (Hanemann, 2005).

Además de su valor de uso directo, el agua proporciona una serie de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación del ciclo hidrológico, la purificación natural y el soporte a la biodiversidad. Estos beneficios no están

reflejados en el precio del agua, lo que lleva a una subestimación de su valor real. Nicholson (2009) resalta la importancia de considerar estos servicios en la valoración económica del agua. Reconocer el valor de estos servicios ecosistémicos podría ayudar a preservar las fuentes de agua y a garantizar su disponibilidad para las generaciones futuras.

La valoración económica del agua resulta fundamental para promover una asignación eficiente del recurso, particularmente en regiones donde la escasez hídrica es un factor limitante del desarrollo. El agua participa en múltiples actividades humanas generando beneficios directos e indirectos que deben ser reconocidos y cuantificados. Su acceso puede ser regulado mediante instrumentos de política o mecanismos de mercado, como ocurre con otros recursos escasos.

Hanemann (2005) sostiene que el valor del agua depende no solo de su disponibilidad física, sino también de su oportunidad de uso y del contexto institucional que define los derechos de propiedad y acceso. En la misma línea, Young (2005) distingue entre el valor de uso, el valor de opción y el valor de existencia del recurso hídrico, enfatizando la importancia de considerar todos estos componentes en su valoración. Gómez-Limón y Riesgo (2004) señalan que asignar un valor económico al agua permite identificar ineficiencias en su uso y diseñar incentivos que favorezcan su reasignación hacia actividades de mayor productividad o impacto social.

En el caso de México, donde existen marcadas asimetrías en el acceso y uso del agua particularmente entre el norte árido y el sur húmedo contar con estimaciones precisas de su valor económico resulta crucial para fundamentar decisiones de gestión, promover la sostenibilidad del recurso y mejorar la equidad en su distribución. Esta perspectiva permite que la valoración económica del agua sirva como herramienta estratégica para apoyar políticas públicas más efectivas y equilibradas en todo el territorio nacional.

Diversos métodos de valoración económica, como los de preferencias reveladas y declaradas, permiten estimar la disposición a pagar de los usuarios

por mejoras en la calidad y disponibilidad del agua, así como evaluar los costos evitados por la prevención de daños ambientales. Estos enfoques son esenciales para diseñar políticas tarifarias equitativas y eficientes, y para priorizar inversiones en infraestructura hídrica (Hanemann, 2005).

La valoración económica del agua y el concepto de huella hídrica constituyen enfoques fundamentales para comprender con mayor precisión la relevancia del recurso hídrico en los sistemas productivos y su vinculación con la sostenibilidad. Según Hanemann (2005), la valoración económica del agua busca asignar un valor monetario al recurso, reflejando su verdadera importancia en términos de bienestar social, ambiental y productivo.

Es importante destacar que, en la mayoría de los casos, los precios que los usuarios pagan por el agua reflejan únicamente los costos operativos relacionados con su captación, tratamiento y distribución, sin incorporar su valor económico total, el cual debería considerar tanto la escasez del recurso como los impactos ambientales derivados de su extracción y uso. Esta omisión contribuye a un uso ineficiente del agua y favorece su sobreexplotación, especialmente en sectores productivos intensivos en el recurso.

En muchos países, el cobro por el uso del agua se limita a cubrir los gastos de inversión en infraestructura y los costos operativos, pero no se realiza un pago directo por el recurso hídrico en sí. Dado que el agua es considerada propiedad del Estado, su derecho de uso suele concederse sin cobro directo. Aunque algunos países aplican tarifas por la extracción de agua, estas suelen tener un carácter meramente administrativo y no están fundamentadas en una valoración económica real del recurso extraído. Por ello, en regiones donde el agua se ofrece a precios bajos, esto no refleja necesariamente una abundancia del recurso, sino más bien una estructura de costos reducida o la existencia de subsidios que encubren su verdadero valor económico (Hanemann 2005).

La huella hídrica total en una zona de captación se considera socialmente insostenible cuando no se satisfacen las necesidades humanas básicas de

todos sus habitantes o cuando no se garantizan condiciones mínimas de equidad (Hoekstra *et al.*, 2011).

Según Nicholson (2009), el establecimiento de precios adecuados incentiva tanto a los consumidores como a las industrias a utilizar el agua de manera más eficiente. Cuando el precio del agua refleja su valor real, los usuarios tienen mayor motivación para invertir en tecnologías de conservación, reducir su consumo y evitar el despilfarro.

La huella hídrica total en una zona de captación se considera económicamente insostenible cuando el agua no se asigna ni se utiliza de manera eficiente desde el punto de vista económico, lo que genera un punto crítico en este ámbito. Los beneficios derivados de una huella hídrica (verde, azul o gris) deberían superar los costos totales asociados, incluyendo las externalidades, los costos de oportunidad y los costos relacionados con la escasez del recurso (Hoekstra *et al.*, 2011).

El agua, al ser un recurso limitado e indispensable para casi todas las actividades humanas, posee un valor económico significativo. Conocer este valor proporciona información valiosa para la gestión de la oferta y la demanda del recurso. Además, la estimación de la huella hídrica en la agricultura permite identificar los cultivos que utilizan el agua de manera más eficiente, lo que es crucial para la sostenibilidad del sector agrícola. (Botello *et al.*, 2024)

Para alcanzar la eficiencia económica, el agua debe asignarse adecuadamente entre los distintos usuarios (eficiencia en la asignación) y, a su vez, cada usuario debe emplearla de forma eficiente (eficiencia productiva). Cuando el precio del agua que paga el usuario es inferior a su costo económico real, tiende a producirse un uso ineficiente; por ello, el grado en que se cobre el costo económico completo al usuario puede considerarse un indicador de sostenibilidad económica (Hoekstra *et al.*, 2011).

Ríos & Navarrete (2017), evidenciaron que una mayor eficiencia en el uso del agua, reflejada en una menor huella hídrica, se traduce también en una mayor

productividad económica del agua. Es decir, reducir el volumen de agua utilizado por unidad de producción no solo favorece la sostenibilidad ambiental, sino que también incrementa el valor económico generado.

La huella hídrica permite no solo medir el uso de agua en diferentes sectores, sino también evidenciar el impacto que las actividades económicas tienen sobre los recursos hídricos locales y globales. Desde esta perspectiva, la huella hídrica revela la "invisibilidad" del consumo de agua, especialmente en bienes agrícolas y pecuarios, y muestra cómo el comercio internacional redistribuye de manera indirecta la presión sobre las fuentes de agua (Hoekstra & Chapagain, 2008).

Al conocer la huella hídrica de un producto o servicio, es posible avanzar hacia una valoración económica más precisa del agua incorporada en su producción. Esto significa que el agua utilizada en cada etapa productiva debe valorarse no solo por su costo de extracción o tratamiento, sino también considerando su disponibilidad relativa, su importancia para los ecosistemas y su valor social y ambiental (Ríos & Navarrete, 2017). El análisis conjunto de la huella hídrica y el valor económico del agua permite evaluar de forma más integral la sostenibilidad del uso de los recursos hídricos. La huella hídrica, al cuantificar el volumen total de agua utilizado en la producción de bienes y servicios, ofrece una perspectiva física del uso del recurso; mientras que el valor económico del agua permite identificar su importancia en términos de uso, disponibilidad, escasez y utilidad.

Incorporar el valor económico del agua en la estimación de la huella hídrica permite, además, diseñar políticas más eficientes para el manejo del recurso.

Como señala Ríos & Navarrete (2017), la integración de criterios económicos en el análisis de la huella hídrica es esencial para lograr una gestión más racional del agua, fomentar la equidad en su distribución y reducir los conflictos por su uso. Asimismo, considerar el valor económico de la huella hídrica facilita la internalización de los costos ambientales en los precios de mercado, promoviendo patrones de consumo más responsables y sostenibles. Al

identificar sectores con alta huella hídrica y bajo valor económico, es posible orientar esfuerzos hacia tecnologías más eficientes, cultivos con mayor rentabilidad hídrica y esquemas de cobro que reflejen el verdadero valor del recurso.

En la mayoría de las aplicaciones de valoración económica relacionadas con las políticas al agua, la cantidad relevante que debe conocerse es el valor marginal del agua en lugar del valor promedio o total. Esto se debe a que, al ser el agua un recurso esencial para la vida, la mayoría de las personas ya cuenta con cierto nivel de acceso. En consecuencia, las decisiones de política pública suelen enfocarse en modificar la cantidad disponible o la calidad del agua suministrada, en lugar de proporcionar acceso desde cero. Por lo tanto, el enfoque marginal resulta más útil para evaluar los beneficios o costos adicionales derivados de cambios incrementales en el suministro o las condiciones del recurso. (Hanemann 2005)

Finalmente, en un contexto de creciente escasez hídrica y de presión sobre los recursos naturales, comprender la huella hídrica en términos de valor económico representa un paso crucial hacia una gestión integrada del recurso. Ello no solo incentiva la eficiencia en el uso del agua, sino que también ayuda a visualizar la necesidad de preservar los ecosistemas acuáticos como elementos esenciales para la seguridad hídrica y alimentaria global.

2.2.4 Huella hídrica y valoración económica del agua

El enfoque de la huella hídrica ha adquirido gran relevancia como indicador del uso del agua en productos y procesos, pero diversos autores han cuestionado su validez y aplicación. Entre ellos, Perry (2014) plantea que, a diferencia de la huella de carbono, cuya reducción genera beneficios globales, la huella hídrica tiene efectos exclusivamente locales, ya que el agua es un recurso territorialmente limitado. Reducir la huella hídrica en una zona sin estrés hídrico no contribuye necesariamente a mejorar la disponibilidad en regiones donde el recurso es escaso.

El autor critica que los métodos empleados por la Water Footprint Network simplifican en exceso la realidad hidrológica. Las estimaciones suelen sobrevalorar el consumo de agua al asumir que la evapotranspiración potencial equivale al uso real, sin considerar factores como el manejo agrícola, el tipo de suelo o las condiciones climáticas. Asimismo, Perry (2014) señala que la clasificación del agua en verde, azul y gris carece de rigor científico, pues estos componentes no son independientes, sino partes interconectadas del mismo ciclo hidrológico.

Desde una perspectiva económica, el autor advierte que la huella hídrica mide volúmenes, pero no integra variables esenciales como la escasez relativa, los costos de oportunidad o el valor agregado del recurso. En consecuencia, una menor huella hídrica no implica necesariamente un uso más eficiente ni beneficios sociales. Los problemas de escasez, señala Perry, deben abordarse mediante una gestión local sustentada en principios hidrológicos y económicos, no mediante indicadores globales que ignoran el contexto específico de cada cuenca o sistema productivo.

Finalmente, Perry (2014) concluye que la huella hídrica puede ser útil como herramienta de sensibilización, pero no constituye una base suficiente para la formulación de políticas ni para la evaluación de sostenibilidad. Propone, en cambio, fortalecer los análisis hidrológicos y económicos que consideren los costos marginales, los beneficios sociales y los impactos ambientales locales, como elementos indispensables para una gestión integrada y eficiente del agua.

2.3 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.
- Bhagat, S., Santra, A. K., Mishra, S., Khune, V. N., Dubey, A., et al. (2020). The water footprint of livestock production system and livestock products: A dark area—A review. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 7(1), 83–88.
<https://www.faunajournal.com/archives/2020/vol7issue1/PartB/7-1-18-591.pdf>
- 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>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations (Value of Water Research Report Series No. 16). UNESCO-IHE.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2024). Recursos hídricos. CEPAL Biblioguías.
<https://biblioguias.cepal.org/c.php?q=934230&p=6736670>
- 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. (2022). Informe sobre la situación de los recursos hídricos en México. Gobierno de México.
- 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
- CONAGUA. (2024b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guerrero-Yepómera (0860), estado de Chihuahua. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- DOF. (2015). NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua. Especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- DOF. (2020). Ley de Aguas Nacionales. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- DOF. (2025). Resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero Guerrero–Yepómera, clave 0860, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico Administrativa Noroeste. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5413894
- 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>
- Esquivel Alcántara, A., & Salgado Vega, M. del C. (2020). Huella hídrica de once productos de origen animal de México y Estados Unidos (Vol. 2). Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A.C. <https://ru.iiiec.unam.mx/5116/>

- 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>
- 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.
- Gómez-Limón, J. A., & Riesgo, L. (2004). Water pricing: Analysis of differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics*, 31(1), 47–66.
- Griffin, R. C. (2006). *Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects*. MIT Press.
- Hanemann, W. M. (2005). The economic conception of water (Working Paper). University of California, Berkeley. https://gspp.berkeley.edu/assets/uploads/research/pdf/The_economic_concpetion_of_water.pdf

- 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. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), 3–8. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0038>
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2008). *Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources*. Wiley-Blackwell.
- 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. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. Euroclima.
- 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.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Guerrero, Chihuahua*.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08031.pdf
- INEGI. (2025). *Hidrografía*. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2015). *Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura*. San José, Costa Rica.
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2023). *El costo del agua en México: Un análisis de tarifas y de sus impactos para la sociedad*.

https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2023/08/Investigacion_Costo-real-del-agua-en-Mexico_31082023-1.pdf

- IPCC. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press.
- 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>
- Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS). (2023). Estructura tarifaria JMAS Chihuahua 2023. Gobierno del Estado de Chihuahua.
- 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.
- Mateo, M. R., Toja, Y. L., Amores, M. J., Navarro, D. M., Cetaqua, D., & Tecnológico, C. (2019). La huella hídrica en el ciclo urbano del agua (pp. 102–106).
- 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->

- Nicholson, C. (2009). Water scarcity and economic development: The implications of water pricing. *Environmental Economics and Policy Studies*, 11(4), 305–317. <https://doi.org/10.1007/s10018-009-0020-7>
- Nicholson, W. (2007). *Microeconomic theory: Basic principles and extensions* (9.^a ed.). Thomson South-Western.
- ONU (United Nations). (2023). *Water Action Agenda / UN 2023 Water Conference: Partnerships and cooperation for water*. [Informe de la Conferencia del Agua 2023]. United Nations.
- 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>
- Pérez, D. (2013). Huella hídrica del sector agropecuario del Perú (Reportes 1, 2 y 3). WWF & ANA. <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/521>
- Perry, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail? *Agricultural Water Management*, 134, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.004>
- Ramírez, J. de J., Meza, C., Rangel, J., & García, A. (2015). Impactos ambientales de la huella hídrica del bovino lechero en la Comarca Lagunera, México: Resultados preliminares. Federación Española de Asociaciones de Ganado Selecto (FEAGAS).
- 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.
- Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1996). *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth*. New Society Publishers.

- Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 93–107.
- Ríos Flores, M. (2015). Agua y economía: Conceptos y aplicaciones en América Latina. UNAM.
- Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2017). Huella hídrica y productividad económica del agua en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) al suroeste de Coahuila, México. *Estudios de Economía Aplicada*, 35(3), 697–716. <https://ojs.ual.es/ojs/index.php/eea/article/view/2503/2903>
- Rodrigues Junior, U. J., & Dziedzic, M. (2021). The water footprint of beef cattle in the Amazon region, Brazil. *Ciência Rural*, 51(8).
- Rodríguez Casado, R., Garrido, A., Llamas, M. R., & Varela-Ortega, C. (2008). La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual*, Fundación Marcelino Botín.
- Rogers, P., Bhatia, R., & Huber, A. (2002). Water as an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Global Water Partnership*.
- 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).
- SEDEMA. (2023, 27 de enero). Reglas de operación del programa social Cosecha de Lluvia 2023. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, No. 1033. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
- 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.
- Siwek, M., Sławińska, A., & Dunisławska, A. (2021). Water in livestock – Biological role and global perspective on water demand and supply chains. En A. Gadomski (Ed.), Water in biomechanical and related systems (pp. 315–331). Springer International Publishing.
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., & Rosales, M. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. https://www.researchgate.net/publication/273308193_La_Larga_Sombra_del_Ganado_Problemas_Ambientales_y_Opciones
- 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. <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.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (2000). Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth. New Society Publishers.
- WMO. (1992). International conference on water and the environment: Development issues for the 21st century (Dublin statement and report of the conference). World Meteorological Organization. <https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>
- WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO.
- Young, R. A. (2005). Determining the economic value of water: Concepts and methods. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781936331628>

3. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA EN LA PRODUCCIÓN DE CARNE DE GANADO BOVINO EN EL MUNICIPIO DE GUERRERO, CHIHUAHUA¹.

Sosa-Márquez, Nayeli.¹; Valdivia-Alcalá, Ramón.^{1*}; Botello-Aguillón, César.¹; Trujillo-Nava, Andrea.¹; Contreras-Castillo José-María¹.

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 estratégico para el desarrollo económico y la producción de alimentos, especialmente en regiones áridas como el norte de México, donde la escasez hídrica representa un desafío creciente. El presente estudio tuvo como objetivo estimar la huella hídrica verde y azul asociada a la producción de carne bovina de la raza Salers bajo un sistema intensivo estabulado en el municipio de Guerrero, Chihuahua. Se aplicó la metodología de la *Water Footprint Network* (WFN), considerando los componentes verde y azul. Se analizaron datos de una unidad productiva con 60,088 cabezas de ganado y una dieta compuesta principalmente por maíz, avena y alfalfa. Los resultados muestran una huella hídrica total de 3,400.87 L/kg de carne producida, valor inferior al promedio global reportado, pero ligeramente superior al registrado en estudios nacionales similares. Las diferencias se atribuyen a la composición de la dieta, la eficiencia alimenticia y las condiciones agroclimáticas locales. Estos hallazgos aportan información valiosa para la gestión integrada del recurso hídrico y el diseño de políticas públicas orientadas a mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sector pecuario en regiones con estrés hídrico.

Palabras clave: huella hídrica, ganadería bovina, sostenibilidad, eficiencia hídrica, Chihuahua.

¹ Artículo enviado a: Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias

3.2 Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y un factor estratégico en el desarrollo de las sociedades. Su disponibilidad influye directamente en la salud pública, la calidad de vida, la producción de alimentos, el crecimiento económico y la estabilidad de los ecosistemas (FAO, 2023). Sin embargo, factores como el crecimiento demográfico, el acelerado desarrollo económico, la urbanización y la contaminación han intensificado la presión sobre un recurso renovable pero limitado, particularmente en zonas áridas y semiáridas (FAO, 2013).

Paralelamente, los efectos del cambio climático están agravando la crisis del agua a nivel global. El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2021) proyecta un aumento en la frecuencia e intensidad de fenómenos extremos, como sequías e inundaciones, debido a las modificaciones en los patrones de precipitación. Estas variaciones incrementan el estrés hídrico y ponen en riesgo la seguridad alimentaria, energética y ambiental.

En consecuencia, la gestión sostenible del agua constituye uno de los principales retos del siglo XXI. Reconociendo esta situación, la Declaración de Dublín (1992) establece en su Principio No. 4 que “el agua tiene un valor económico en todos sus usos competitivos y debe reconocerse como un bien económico” (WMO, 1992). Este principio transformó la percepción del agua como recurso gratuito hacia un enfoque que considera su valor limitado y promueve su uso eficiente y equitativo mediante la incorporación de criterios económicos en su gestión.

En las últimas décadas, se han desarrollado diversos conceptos e indicadores ambientales orientados a cuantificar el impacto de las actividades humanas sobre los recursos naturales y el medio ambiente, así como a optimizar la asignación del agua entre distintos usos productivos. Entre los más destacados se encuentran la huella ecológica, la huella de carbono, el agua virtual y la huella hídrica (Botello *et al.*, 2022).

El concepto de huella hídrica, introducido por Hoekstra (2003), se ha consolidado como un indicador clave para cuantificar el volumen total de agua dulce utilizada de forma directa o indirecta en la producción de bienes y servicios. Esta metodología distingue tres componentes: huella verde (agua de lluvia almacenada en el suelo), huella azul (agua superficial o subterránea) y huella gris (volumen requerido para diluir contaminantes), lo que permite una evaluación integral del impacto hídrico (Hoekstra *et al.*, 2011).

La estimación de la huella hídrica se ha hecho para diversos productores agrícolas y pecuarios, entre los que se puede mencionar: la HH de la producción de sotol (Cereceres, 2021), la producción de la caña de azúcar (Garay *et al.*, 2022); la HH de carne bovina en sistema de engorda intensiva (Trujillo *et al.*, 2022); de la carne bovina en la región amazónica de Brasil (Rodrigues & Dziedzic, 2021); la HH de varios cultivos producidos en diferentes regiones de México (Botello *et al.* 2024; Vázquez & Lambarri, 2017).

Hoekstra *et al.*, (2011) señala que, los beneficios económicos generados por una huella hídrica (verde, azul o gris) deben superar los costos totales que implica su uso, incluidos los costos de oportunidad, las externalidades y los asociados a la escasez del recurso. Lograr la eficiencia económica requiere asignar el agua de manera adecuada entre los distintos usuarios y garantizar que cada uno la utilice con eficiencia productiva.

La HH integra dimensiones cuantitativas, espaciales y temporales del recurso, y constituye una herramienta estratégica para diseñar políticas públicas orientadas al manejo eficiente del agua (Aldaya *et al.*, 2010; Vázquez & Lambarri, 2017). Su aplicación resulta especialmente relevante en sectores de alto consumo hídrico, como la agricultura y la ganadería. A nivel mundial, la agricultura representa cerca del 70 % de la extracción de agua dulce y más del 90 % de su uso consuntivo (FAO, 2023). Por consiguiente, la escasez de agua compromete la producción agrícola y amenaza la seguridad alimentaria global.

En México, el sector agropecuario concentra el 76.3 % del uso consuntivo del agua (SEMARNAT, 2023). Dentro de este sector, la ganadería bovina

constituye una actividad económica estratégica, al ocupar más de la mitad del territorio nacional y generar ingresos relevantes por exportaciones (SADER, 2024). El país ocupa el quinto lugar mundial en producción de carne bovina, con un inventario estimado de 24.5 millones de cabezas en 2022, de las cuales el 50.4 % se localiza en los estados de Veracruz, Jalisco, Chihuahua, Chiapas, Durango, Tabasco y Sonora (INEGI, 2023).

El estado de Chihuahua presenta una consolidada vocación ganadera, con 1.12 millones de hectáreas agrícolas (el 51 % bajo riego) y aproximadamente 17.5 millones de hectáreas destinadas a la ganadería (SIAP, 2023). Sin embargo, la elevada dependencia del agua subterránea para el riego ha generado una severa sobreexplotación de acuíferos, reduciendo la disponibilidad y calidad del recurso (INIFAP, 2021).

La producción de carne bovina es una de las actividades con mayor huella hídrica debido a los altos volúmenes de agua requeridos a lo largo de toda la cadena productiva desde el cultivo de forrajes y el consumo animal, hasta los procesos industriales y la distribución (Steinfeld *et al.*, 2009). De acuerdo con Mekonnen & Hoekstra (2010), la producción de un kilogramo de carne de res puede demandar hasta 15,400 litros de agua, aunque este valor varía según el sistema de producción, la dieta del ganado, las condiciones agroecológicas y la eficiencia de conversión alimenticia (Trujillo *et al.*, 2022).

En este contexto, la huella hídrica se posiciona como una herramienta útil para evaluar la sostenibilidad de los sistemas ganaderos, especialmente en regiones con estrés hídrico. El presente estudio tiene como objetivo estimar la huella hídrica verde y azul de la carne bovina producida en un sistema estabulado en el municipio de Guerrero, Chihuahua, utilizando una dieta específica para la raza Salers. Además, se pretende generar información técnica que respalde la toma de decisiones, tanto en el ámbito productivo como en la formulación de políticas públicas orientadas a una gestión más sostenible del recurso hídrico.

3.3 Materiales y métodos

El estado de Chihuahua se ha consolidado como uno de los principales productores de ganado bovino en México, ocupa el tercer lugar en el inventario ganadero nacional y el primer lugar en la exportación de becerros en pie hacia Estados Unidos (SIAP, 2023). Según el Censo Agropecuario 2022, el Estado registró un total de 1,746,817 cabezas de ganado bovino. Diecinueve municipios concentran el 78% de la producción estatal, sobresaliendo aquellos ubicados en la región noroeste: Chihuahua, Namiquipa, Cuauhtémoc, Camargo, Janos, Saucillo y Guerrero. (INEGI, 2023).

La investigación se centró en el municipio de Guerrero, Chihuahua, dada su importancia productiva y sus condiciones agroecológicas propicias para la actividad ganadera. Este municipio se localiza dentro de la Región Hidrológico-Administrativa II Noroeste y en la cuenca del Río Yaqui, caracterizada por una baja disponibilidad de agua superficial y una fuerte dependencia del agua subterránea proveniente de acuíferos sobreexplotados (INEGI, 2010; CONAGUA, 2022). Según datos del INEGI (2024), la precipitación media anual en la zona se encuentra entre 457.5 mm, y la región ha sido clasificada bajo condiciones de sequía extrema (D3) por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2025).

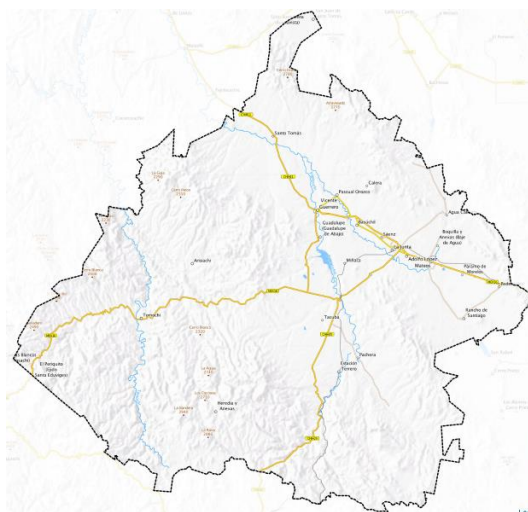


Figura 14. Municipio de Guerrero, Chihuahua

Fuente: INEGI, 2025

La raza seleccionada para el estudio fue la Salers, cuya elección se fundamenta en su representatividad dentro de la ganadería bovina de carne en el estado de Chihuahua, así como en sus características de rusticidad, eficiencia alimenticia y adaptabilidad a condiciones adversas. Estas cualidades la hacen altamente relevante para los sistemas de engorda o estabulación en regiones semiáridas, donde los recursos hídricos son limitados (De la Fuente *et al.*, 2017; SADER, 2025).

El sistema de producción considerado fue el intensivo tipo feedlot, en el cual los bovinos se mantienen en confinamiento y se les suministra una dieta balanceada con el objetivo de maximizar la ganancia diaria de peso y mejorar la eficiencia alimenticia (Livas, 2015). Este sistema permite un mayor control sobre los factores de producción, facilitando la evaluación precisa de los insumos y el uso de agua.

Los datos sobre las estadísticas agrícolas fueron obtenidos de CONAGUA (2023), mientras que las estadísticas pecuarias se obtuvieron del Censo Agropecuario 2022 en INEGI (2023). La información sobre los insumos forrajeros y la cantidad de agua utilizada proviene de datos reportados para México, considerándose uniforme en toda la región (Ríos *et al.*, 2015). El estudio fue aplicado para un total de 60,088 cabezas de ganado bovino.

La información relativa a la dieta, peso final, tasa de conversión alimenticia y duración del ciclo de engorda fue proporcionada por la unidad productiva evaluada. La dieta estuvo compuesta por ingredientes regionales, agrupados en dos categorías principales: cultivos forrajeros (maíz, avena, alfalfa) y alimentos balanceados (melaza, concentrados). Para estimar la huella hídrica de estos insumos se recurrió a bases de datos nacionales y a literatura científica ajustada a las condiciones agroclimáticas locales (Sánchez *et al.*, 2016).

El consumo directo de agua por parte del ganado se estimó a partir de los requerimientos diarios promedio, considerando el peso vivo, la temperatura ambiental y el tipo de dieta. Conforme a Mekonnen & Hoekstra (2010), la huella

hídrica de un animal puede expresarse en m³/animal/año o acumulada a lo largo de su vida útil.

La estimación se realizó con base en la metodología propuesta por la Water Footprint Network (WFN), desarrollada por Mekonnen & Hoekstra (2012), y adaptada para este estudio a partir del enfoque utilizado por Trujillo *et al.* (2022). Se consideraron únicamente los componentes verde y azul de la huella hídrica. La huella gris fue excluida debido a la falta de datos sobre carga contaminante.

El procedimiento de estimación de la huella hídrica (HH) por animal inicia con el cálculo del producto final (PF) por cabeza, el cual se obtiene mediante la siguiente expresión

$$PF = \frac{P}{Pob}$$

Donde P es la producción anual total de carne bovina en el estado (kg/año) Y Pob es la población total de ganado bovino en el estado (cabezas). Posteriormente, se estima la eficiencia de conversión alimenticia (EEC), definida como

$$EEC = \frac{CA}{PF}$$

Donde CA es el consumo de alimento por cabeza (expresado en kg de materia seca/año/animal) y PF es el producto final por cabeza (kg/año/animal). Con base en esta eficiencia, se calcula la cantidad total de alimento consumido en el estado

$$Alimento[n] = EEC \times P$$

Donde Alimento[n] es la cantidad total consumida del alimento n (ton/año), EEC representa la eficiencia de conversión alimenticia (kg de alimento por kg de producto) y P es la producción total de carne bovina en el estado (ton/año).

Una vez determinado el consumo total de cada ingrediente forrajero, se calcula la huella hídrica del alimento consumido por animal mediante la siguiente fórmula:

$$HH_{alimento} = \frac{\sum_{p=1}^n (alimento[n] \times HH_{prod}[n])}{Pob}$$

Donde Alimento[n] es la cantidad consumida anualmente del ingrediente n (ton/año), HH_{prod} [n] es la huella hídrica del ingrediente n (m³/ton) y Pob es el número de animales sacrificados por año en el estado.

Finalmente, se estima la huella hídrica total por animal, conforme a la metodología propuesta por Mekonnen y Hoekstra (2012), como la suma de tres componentes principales:

$$HH = HH_{alimento} + HH_{agua} + HH_{serv}$$

Donde HH es la huella hídrica total por animal (m³/animal), HH_{alimento} corresponde al agua virtual contenida en los alimentos consumidos, HH_{agua} representa el volumen de agua ingerido directamente por el animal durante su vida útil y HH_{serv} se refiere al agua utilizada en los servicios de la unidad de producción (limpieza, mantenimiento, etc.).

Cabe señalar que en el presente estudio no se considera la huella hídrica gris, correspondiente al volumen de agua requerido para diluir contaminantes generados en el proceso productivo, por lo que el componente HH_{serv} ha sido excluido del análisis.

3.4 Resultados y Discusión

Los resultados se presentan mostrando la estimación del consumo diario por cabeza de acuerdo con la etapa de engorda del animal. Posteriormente, se analiza el consumo total de agua de bebida y de alimento, así como la huella hídrica asociada a la producción de carne bovina en el sistema estabulado. Finalmente, se comparan los valores obtenidos con los reportados en la literatura, a fin de contextualizar la eficiencia hídrica del sistema evaluado.

El agua destinada al consumo del ganado bovino debe cumplir con estándares de calidad que garanticen su inocuidad, es decir, ser limpia, inodora, incolora, fresca y libre de contaminantes físicos, químicos y biológicos que puedan afectar la salud y la productividad de los animales (González, 2018). La cantidad de agua ingerida por los bovinos depende de diversos factores, entre ellos el peso corporal, la etapa fisiológica, las condiciones ambientales, el tipo de dieta y el nivel de actividad física (Brew *et al.*, 2018).

Durante el periodo de engorda, los bovinos permanecieron en confinamiento bajo un sistema estabulado, con acceso permanente a agua de buena calidad y en cantidad suficiente durante los 120 días que comprende el ciclo productivo. La población analizada estuvo conformada por 60,088 cabezas de ganado. Para este estudio, se consideró una temperatura media anual de 13.6 °C, correspondiente al clima del municipio de Guerrero, Chihuahua. Los pesos corporales promedio considerados durante las etapas del ciclo de engorda fueron: fase de reciba: 315.8 kg; fase de desarrollo: 349.3 kg; y fase de finalización: 437.4 kg, los cuales reflejan el comportamiento productivo típico de la raza Salers en confinamiento.

El consumo promedio diario de agua por cabeza fue estimado en 37.5 litros. De este modo, el consumo total de agua de bebida por animal durante el ciclo completo se estimó en 4,500.47 litros. En el cuadro 1 se presenta el consumo diario y el consumo total de agua bebido por periodo, dando un volumen total de 270,424,499 m³.

Cuadro 2. Consumo de agua del ganado bovino en engorda

Periodo	Consumo diario/cabeza (L)	Duración del periodo (días)	Consumo por periodo y total de cabezas (m ³ de agua)
Reciba	28.0	21	35,346,886
Arranque	34.4	21	43,467,130
Finalización	40.9	78	191,610,483
Total			270,424,499

Fuente: Elaboración propia con datos de registros de alimentación.

En lo referente a la alimentación, se diseñaron y emplearon tres dietas diferenciadas, correspondientes a las etapas de reciba, desarrollo y finalización del ciclo de engorda. Si bien todas las fórmulas se elaboraron a partir de los mismos ingredientes básicos, se ajustaron las proporciones y cantidades de cada componente conforme a los requerimientos. Estas variaciones respondieron a los requerimientos nutricionales de cada fase productiva. El consumo de alimento se estimó en función del peso vivo de los animales y de la ganancia diaria promedio proyectada, lo cual permitió calcular el consumo de materia seca (MS) y la ingesta total de alimento por etapa. Los detalles de estas estimaciones se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 3. Peso promedio, ganancia de peso y consumo alimenticio por etapa

Periodo	Peso promedio (kg)	Ganancia diaria promedio (kg)	Consumo MS diario (kg)	% de MS	Consumo total de alimento/día (kg)
Reciba	315.8	1.5	7.818	74.68	10.469
Desarrollo	349.3	1.7	7.756	81.08	9.566
Finalización	437.4	1.8	9.163	83.98	10.911

Fuente: Elaboración propia con datos de registros de alimentación.

La dieta del ganado estuvo compuesta por una combinación de forrajes y alimentos balanceados, formulada para satisfacer los requerimientos nutricionales en cada etapa del ciclo de engorda. En la elaboración de estas dietas se utilizaron diversos ingredientes, de los cuales se consideraron para el cálculo de la huella hídrica únicamente aquellos de origen agrícola directo. Entre estos insumos se incluyeron el maíz en sus diferentes presentaciones (grano, molido y rolado), maíz para forraje (ensilaje), heno de avena y heno de alfalfa.

Con base en las fórmulas de alimentación establecidas para cada etapa del periodo productivo (recepción, desarrollo y finalización), se estimó la cantidad total de alimento consumido por el ganado a lo largo del ciclo de engorda. Al integrar los consumos correspondientes a cada fase, se obtuvo un total de

76,418.7 toneladas de alimento, valor que representa la suma de los diferentes ingredientes considerados en la dieta formulada para la producción, como se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro 4. Consumo total por periodo			
Periodo	Duración del periodo en días	Consumo de alimento (kg)/día/cabeza	Consumo total de alimento (ton) por periodo
Reciba	21	10.469	13,209.9
Desarrollo	21	9.566	12,070.7
Finalización	78	10.911	51,138.1
Total			76,418.7

Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, la producción de los cultivos agrícolas que integran la dieta del ganado bovino demandó un volumen total de 25,069,155.02 m³ de agua. Este valor se obtuvo a partir del cálculo del consumo total de cada ingrediente (expresado en toneladas) y su respectiva huella hídrica específica (litros por kilogramo), la cual se presenta en el cuadro 4.

Cuadro 5. Volumen de agua utilizado en la producción de los cultivos consumidos en la dieta del ganado			
Cultivos	Cantidades consumidas (ton)	Huella hídrica (litros/kg)	Volumen de agua usado en los ingredientes (m ³)
Maíz para forraje (ensilaje)	10,226.91	108	1,100,350.82
Maíz para grano	12,783.81	514	6,564,777.47
Avena forrajera para henificar	34,963.88	310	10,832,469.97
Alfalfa forrajera para henificar	10,802.33	608	6,571,556.76
Total	68,776.92		25,069,155.02

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2024).

Los resultados obtenidos en la presente investigación se presentan en el Cuadro 5, donde se observa que la huella hídrica total de la carne bovina

asciende a 3400.87 L/kg, considerando únicamente los componentes verde y azul. Dicho resultado permite dimensionar la magnitud del recurso hídrico requerido para la producción de carne en sistemas estabulados, y constituye un indicador clave para evaluar la eficiencia y sostenibilidad del sistema analizado.

Cuadro 6. Huella hídrica azul y verde en la producción de ganado bovino de la raza Salers

Ganancia total de peso por cabeza	Ganancia promedio diaria	Peso en pie	Consumo total de alimento por cabeza	Conversión alimenticia	Peso del canal por cabeza	Rendimiento en canal	Huella Hídrica
200 kg	1.67 kg	500 kg	1271.7 kg	6.359 kg	310 kg	62%	3400.87 L/kg

Fuente: Elaboración propia.

El valor obtenido en este estudio es considerablemente menor a los reportados en la literatura internacional. Mekonnen & Hoekstra (2012) estimaron una huella hídrica promedio de 15,400 L/kg para sistemas de producción extensivos, mixtos e intensivos a nivel global. En la región amazónica de Brasil, la producción de carne bovina presenta un valor de 13,074 L/kg, asociado a la alta disponibilidad de agua verde y al manejo eficiente de pastizales (Rodrigues & Dziedzic, 2021). Por su parte, en los Estados Unidos, los sistemas intensivos alcanzan valores de 4,552 L/kg, reflejando una mayor eficiencia en el uso del recurso hídrico (Esquivel & Salgado, 2020).

En el contexto nacional, Trujillo *et al.* (2022) reportaron para el estado de Querétaro una huella hídrica de 2,972.4 L/kg en sistemas de engorda estabulada, valor ligeramente inferior al obtenido en el presente estudio, mientras que en la Comarca Lagunera se han registrado valores de 13,570 L/kg (Navarrete *et al.*, 2019).

Estas diferencias pueden explicarse por varios factores: (1) el uso de una dieta más eficiente con menor proporción de ingredientes de alta demanda hídrica; (2) condiciones agroclimáticas locales que favorecen la producción de forrajes

con mayor rendimiento hídrico; y (3) un manejo zootécnico enfocado en la reducción de tiempos de engorda y mejora de la conversión alimenticia.

La estimación local de la huella hídrica responde a una necesidad prioritaria identificada por autores como Garay *et al.* (2022) y Ríos Flores (2015), quienes destacan que la valoración económica y ecológica del agua debe basarse en información contextualizada, particularmente en zonas con alta competencia entre usos productivos, domésticos y ambientales.

Conocer la huella hídrica de la producción de carne bovina permite avanzar hacia una valoración económica más precisa del agua utilizada en el proceso. Como señalan Ríos & Navarrete (2017), una mayor eficiencia en el uso del agua, reflejada en una huella hídrica menor, se traduce en un incremento de la productividad económica del recurso. En otras palabras, reducir el volumen de agua por unidad de producción no solo favorece la sostenibilidad ambiental, sino que también aumenta el valor económico generado por el agua.

3.5 Conclusiones

El análisis de la huella hídrica en la producción de carne bovina estabulada permitió evidenciar la magnitud del consumo de agua asociado a esta actividad y resaltar la importancia de adoptar prácticas más eficientes, especialmente en un contexto de alta presión hídrica. La diferenciación entre los componentes verde y azul proporciona información clave sobre el origen del recurso utilizado, facilitando la identificación de puntos críticos del sistema productivo donde se pueden implementar estrategias de optimización.

Las variaciones observadas frente a estudios previos reflejan la influencia de factores locales, como las condiciones agroclimáticas, el tipo de dieta y el sistema de producción, lo que evidencia la necesidad de adaptar metodologías de estimación y políticas de gestión del agua a contextos regionales específicos.

La adopción de prácticas agrícolas que incrementen los rendimientos de los cultivos y optimicen la aplicación del riego contribuye a reducir la huella hídrica

de los insumos alimenticios, generando a su vez beneficios económicos para los productores, al disminuir costos y mejorar la eficiencia del recurso. Integrar estos enfoques en la planeación agropecuaria fortalecerá la sostenibilidad del sector ganadero, especialmente en regiones semiáridas con alta presión hídrica, como el norte de México.

Finalmente, incorporar criterios económicos y ambientales al análisis de la huella hídrica permitiría fortalecer la toma de decisiones orientadas a un uso más equitativo y racional del agua.

3.6 Literatura citada.

Aldaya, M. M., Martínez-Santos, P., & Llamas, M. R. (2010). Incorporating the water footprint and virtual water into policy: Reflections from the Mancha Occidental Region, Spain. *Water Resources Management*, 24(5), 941–958.

Botello-Aguillón, C., Valdivia-Alcalá, R., Hernández-Ortiz, J., Sangermán-Jarquín, D. M., & Gutiérrez-García, F. G. (2022). Reallocation of water in agriculture under drought conditions as economic efficiency maximizer. *Agro Productividad*, 15(8), 187–194.
<https://doi.org/10.32854/agrop.v15i8.2191>

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>

Brew, M. N., Carter, J., & Maddox, M. K. (2018). El impacto de la calidad del agua en la salud y performance del ganado de carne. Universidad de Florida.

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>

- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations (Value of Water Research Report Series No. 16). UNESCO-IHE.
- CONAGUA. (2022). Informe sobre la situación de los recursos hídricos en México. Gobierno de México.
- 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
- De la Fuente, J., Salazar, A., & Ramírez, L. (2017). Razas bovinas para sistemas intensivos de producción. Universidad Autónoma Chapingo.
- Esquivel Alcántara, A., & Salgado Vega, M. del C. (2020). Huella hídrica de once productos de origen animal de México y Estados Unidos (Vol. 2). Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A.C. <https://ru.iiec.unam.mx/5116/>
- Falkenmark, M. (1984). New ecological approach to the water cycle: Ticket to the future. *AMBIO*, 13(3), 152–160.
- 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, 22 de marzo). Water scarcity means less water for agriculture production which in turn means less food available, threatening food security and nutrition. FAO Newsroom. <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>
- 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.

- González Martínez, K. (2018). Calidad del agua para consumo del bovino. *Zootecnia y Veterinaria es mi Pasión*.
- Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water: An introduction. En A. Y. Hoekstra (Ed.), *Virtual water trade: Proceedings of the International Expert Meeting on Virtual Water Trade* (pp. 13–23). UNESCO-IHE. <https://www.waterfootprint.org/media/downloads/Report12.pdf>
- Hoekstra, A. Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), 3–8. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0038>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan.
- IICA. (2020). *Gestión sostenible del agua en la agricultura: Un enfoque territorial e integrado*. IICA.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Guerrero, Chihuahua*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08031.pdf
- INEGI. (2023). *Censo agropecuario 2022: Resultados definitivos*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdn_al.pdf
- INIFAP. (2021). *Reporte anual 2021: Ciencia y tecnología para el campo mexicano, Chihuahua. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/786721/REPORTE_ANUAL_CIRNOC_Chihuahua.pdf
- Livas, R. (2015). *Sistemas intensivos de engorda de bovinos: manejo y productividad*. Universidad Autónoma de Nuevo León.

- 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. (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>
- Navarrete, C., Meza, C. A., Ramirez, J. J., Herrera, M. A., Lopez, N., Lopez, M. A., & Veliz, F. G. (2019). Economic evaluation of the environmental impact of a dairy cattle intensive production cluster under arid lands conditions. *animal*, 13(10), 2379-2387.
- Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 93–107.
- Ríos Flores, M. (2015). Agua y economía: Conceptos y aplicaciones en América Latina. UNAM.
- Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2017). Huella hídrica y productividad económica del agua en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) al suroeste de Coahuila, México. *Estudios de Economía Aplicada*, 35(3), 697–716. <https://ojs.ual.es/ojs/index.php/eea/article/view/2503/2903>
- Rodrigues Junior, U. J., & Dziedzic, M. (2021). The water footprint of beef cattle in the Amazon region, Brazil. *Ciência Rural*, 51(8).
- SADER. (2024). Panorama de la producción de carne bovina en México 2024. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- SADER. (2025). Salers, la raza balanceada en ExpoGan Chihuahua 2025. Gobierno de México

- Sánchez, C., Esquivel, A., & Rojas, M. (2016). Evaluación de la huella hídrica de cultivos forrajeros en México. Universidad Autónoma Chapingo.
- SEMARNAT. (2023). Informe de la situación del medio ambiente en México 2023. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2025). Monitoreo de sequías en México: Informe técnico anual. CONAGUA.
- SIAP. (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>
- SIAP. (2023). Avance de la producción pecuaria estatal 2023. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/siap>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., & Rosales, M. (2009). La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones. FAO. <https://www.fao.org/3/a1250s/a1250s.pdf>
- 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. <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.
- WMO. (1992). International conference on water and the environment: Development issues for the 21st century (Dublin statement and report of the conference). World Meteorological Organization. <https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>

4. CONCLUSIONES GENERALES

El agua constituye un recurso esencial y estratégico, cuya disponibilidad y calidad condicionan el desarrollo económico, social y ambiental de las regiones, especialmente en áreas semiáridas y áridas con alta escasez hídrica. En este contexto, la presente investigación aporta evidencia analítica sobre el volumen de agua requerido en la producción de carne bovina estabulada en el municipio de Guerrero, Chihuahua, contribuyendo a una comprensión más profunda de los vínculos entre la ganadería intensiva y el consumo hídrico asociado a esta actividad.

La cuantificación de la huella hídrica verde y azul en el sistema de engorda de ganado de la raza Salers permitió estimar un consumo total de 3,400.87 litros de agua por kilogramo de carne producida. Este análisis evidenció la relevancia de identificar la procedencia del agua utilizada y los factores que influyen en su eficiencia. Asimismo, las diferencias observadas respecto a estimaciones a nivel nacional e internacional reflejan la influencia de las condiciones agroclimáticas, las prácticas de manejo y la composición de la dieta sobre la dinámica del consumo hídrico.

Desde una perspectiva económica y ambiental, la diferenciación de las componentes verde y azul facilita la identificación de los puntos críticos del sistema productivo y la definición de estrategias de mejora. Entre las medidas con mayor potencial destacan la modernización de los sistemas de riego, la utilización de cultivos forrajeros con menor demanda hídrica y la implementación de tecnologías que incrementen la eficiencia alimenticia. Estas acciones no solo contribuyen a reducir el impacto ambiental de la producción, sino que también fortalecen la rentabilidad del sistema, generando beneficios tanto para los productores como para la sociedad en general.

Metodológicamente, la aplicación del enfoque propuesto por la Water Footprint Network demostró ser pertinente y adaptable a las condiciones locales, al integrar variables agroclimáticas y zootécnicas específicas. Este resultado subraya la importancia de realizar estudios regionales que sirvan de base para

políticas públicas contextualizadas, orientadas hacia un manejo sostenible del agua, particularmente en zonas con altos niveles de estrés hídrico.

Los hallazgos confirman la necesidad de promover una gestión integrada de los recursos hídricos, basada en principios de eficiencia, equidad y sostenibilidad. Incorporar el análisis de la huella hídrica en la planificación agropecuaria puede fortalecer los procesos de toma de decisiones, tanto gubernamentales como empresariales, facilitando una asignación racional del recurso y reduciendo los conflictos entre sus distintos usos. Finalmente, esta investigación sienta las bases para futuras líneas de estudio, incluyendo la valoración económica del agua en la producción pecuaria, la estimación de la huella hídrica gris y la evaluación de los impactos potenciales del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso. Profundizar en estos enfoques permitirá avanzar hacia un modelo de producción ganadera más sostenible, resiliente, rentable y competitivo.

5. LITERATURA CITADA

AgroDer. (2012). Huella hídrica en México en el contexto de Norteamérica. WWF México y AgroDer.

Alcamo, J., Henrichs, T., & Rösch, T. (2003). World water in 2025 Global modeling and scenario analysis for the World Commission on Water for the 21st Century. *Water Policy*, 5(1), 1–15.
<https://doi.org/10.2166/wp.2003.0002>

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. (1993). Fortunately there are substitutes for water otherwise our hydro-political futures would be impossible. In *Priorities for Water Resources Allocation and Management* (pp. 13–26). Overseas Development Administration (ODA).

- 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.
- Bhagat, S., Santra, A. K., Mishra, S., Khune, V. N., Dubey, A., et al. (2020). The water footprint of livestock production system and livestock products: A dark area—A review. *International Journal of Fauna and Biological Studies*, 7(1), 83–88.
<https://www.faunajournal.com/archives/2020/vol7issue1/PartB/7-1-18-591.pdf>
- 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>
- Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2004). Water footprints of nations (Value of Water Research Report Series No. 16). UNESCO-IHE.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2024). Recursos hídricos. CEPAL Biblioguías.
<https://biblioguias.cepal.org/c.php?q=934230&p=6736670>
- 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. (2022). Informe sobre la situación de los recursos hídricos en México. Gobierno de México.
- 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
- CONAGUA. (2024b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guerrero-Yepómera (0860), estado de Chihuahua. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua. Especificaciones y método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- DOF. (2020). Ley de Aguas Nacionales. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión.
- DOF. (2025). Resultado de los estudios técnicos de aguas nacionales subterráneas del Acuífero Guerrero–Yepómera, clave 0860, en el Estado de Chihuahua, Región Hidrológico Administrativa Noroeste. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5413894
- 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>
- Esquivel Alcántara, A., & Salgado Vega, M. del C. (2020). Huella hídrica de once productos de origen animal de México y Estados Unidos (Vol. 2). Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, A.C. <https://ru.iiiec.unam.mx/5116/>

- 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>
- 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.
- García-Rubio, M. A., Gómez, R., & Martínez, E. (2021). Water resources management in urban areas: Challenges and opportunities. *Water Resources Journal*, 45(2), 199–210.
- Gómez-Limón, J. A., & Riesgo, L. (2004). Water pricing: Analysis of differential impacts on irrigated farms. *Agricultural Economics*, 31(1), 47–66.
- Griffin, R. C. (2006). *Water resource economics: The analysis of scarcity, policies, and projects*. MIT Press.
- Hanemann, W. M. (2005). *The economic conception of water* (Working Paper). University of California, Berkeley.

https://gspp.berkeley.edu/assets/uploads/research/pdf/The_economic_competition_of_water.pdf

- Hanemann, W. M. (2006). The economic conception of water. In P. P. Rogers, M. R. Llamas, & L. Martínez-Cortina (Eds.), *Water crisis: Myth or reality?* (pp. 61–91). Taylor & Francis.
- Hoekstra, A. Y. (2012). The hidden water resource use behind meat and dairy. *Animal Frontiers*, 2(2), 3–8. <https://doi.org/10.2527/af.2012-0038>
- Hoekstra, A. Y. (Ed.). (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., & 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. (2017). *Guía metodológica para la evaluación de la huella hídrica en una cuenca hidrográfica*. Euroclima.
- 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.
- INEGI. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010: Guerrero, Chihuahua*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/08/08031.pdf

- INEGI. (2023). Censo Agropecuario 2022: Resultados definitivos. https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ca/2022/doc/ca2022_rdnal.pdf
- INEGI. (2024). México en cifras — Área geográfica: Chihuahua. <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=08#collapse-Resumen>
- INEGI. (2025). Hidrografía. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>
- INIFAP. (2021). Reporte anual 2021: Ciencia y tecnología para el campo mexicano, Chihuahua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/786721/REPORTE_ANAL_CIRNOC_Chihuahua.pdf
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2015). Innovación y gestión del agua para el desarrollo sostenible en la agricultura. San José, Costa Rica.
- Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO). (2023). El costo del agua en México: Un análisis de tarifas y de sus impactos para la sociedad. https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2023/08/Investigacion_Costo-real-del-agua-en-Mexico_31082023-1.pdf
- IPCC. (2014). Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. <https://www.ipcc.ch>
- 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>
- Junta Municipal de Agua y Saneamiento de Chihuahua (JMAS). (2023). Estructura tarifaria JMAS Chihuahua 2023. Gobierno del Estado de

Chihuahua.

<https://www.jmaschih.gob.mx/files/Normatividad/2023%20Estructura%20Tarifaria%20JMAS%20Chihuahua.pdf>

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.

Mateo, M. R., Toja, Y. L., Amores, M. J., Navarro, D. M., Cetaqua, D., & Tecnológico, C. (2019). La huella hídrica en el ciclo urbano del agua (pp. 102–106).

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->

Navarrete, C., Meza, C. A., Ramirez, J. J., Herrera, M. A., Lopez, N., Lopez, M. A., & Veliz, F. G. (2019). Economic evaluation of the environmental impact of a dairy cattle intensive production cluster under arid lands conditions. *animal*, 13(10), 2379-2387.

Nicholson, C. (2009). Water scarcity and economic development: The implications of water pricing. *Environmental Economics and Policy Studies*, 11(4), 305–317. <https://doi.org/10.1007/s10018-009-0020-7>

Nicholson, W. (2007). *Microeconomic theory: Basic principles and extensions* (9.^a ed.). Thomson South-Western.

- ONU (United Nations). (2023). Water Action Agenda / UN 2023 Water Conference: Partnerships and cooperation for water. [Informe de la Conferencia del Agua 2023]. United Nations.
- 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>
- Pérez, D. (2013). Huella hídrica del sector agropecuario del Perú (Reportes 1, 2 y 3). WWF & ANA.
<https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/521>
- Perry, C. (2014). Water footprints: Path to enlightenment, or false trail? *Agricultural Water Management*, 134, 119–125.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.12.004>
- Pimentel, D., Berger, B., Filiberto, D., Newton, M., Wolfe, B., Karabinakis, E., Clark, S., Poon, E., Abbett, E., & Nandagopal, S. (2004). Water resources: Agricultural and environmental issues. *BioScience*, 54(10), 909–918.
[https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0909:WRAAEI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0909:WRAAEI]2.0.CO;2)
- Ramírez, J. de J., Meza, C., Rangel, J., & García, A. (2015). Impactos ambientales de la huella hídrica del bovino lechero en la Comarca Lagunera, México: Resultados preliminares. *Federación Española de Asociaciones de Ganado Selecto (FEAGAS)*.
- 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.
- Rees, W. E., & Wackernagel, M. (1996). *Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth*. New Society Publishers.

- Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80(1–3), 5–22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Ríos Flores, J. L., Torres Moreno, M., Castro Franco, R., Torres Moreno, M. A., & Ruiz Torres, J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 47(1), 93–107.
- Ríos Flores, M. (2015). Agua y economía: Conceptos y aplicaciones en América Latina. UNAM.
- Ríos-Flores, J. L., & Navarrete-Molina, C. (2017). Huella hídrica y productividad económica del agua en nogal pecanero (*Carya illinoensis*) al suroeste de Coahuila, México. *Estudios de Economía Aplicada*, 35(3), 697–716. <https://ojs.ual.es/ojs/index.php/eea/article/view/2503/2903>
- Rodrigues Junior, U. J., & Dziedzic, M. (2021). The water footprint of beef cattle in the Amazon region, Brazil. *Ciência Rural*, 51(8).
- Rodríguez Casado, R., Garrido, A., Llamas, M. R., & Varela-Ortega, C. (2008). La huella hidrológica de la agricultura española. *Papeles de Agua Virtual*, Fundación Marcelino Botín.
- Rogers, P., Bhatia, R., & Huber, A. (2002). Water as an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Global Water Partnership*.
- 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).
- SEDEMA. (2023, 27 de enero). Reglas de operación del programa social Cosecha de Lluvia 2023. *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*, No. 1033. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México.
- 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.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2025). Monitoreo de sequías en México: Informe técnico anual. CONAGUA.
- SIAP. (2016). La huella hídrica: el agua que usamos. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/articulos/la-huella-hídrica-el-agua-que-usamos>
- Siwek, M., Sławińska, A., & Dunisławska, A. (2021). Water in livestock – Biological role and global perspective on water demand and supply chains. En A. Gadomski (Ed.), Water in biomechanical and related systems (pp. 315–331). Springer International Publishing.
- SMN. (2024). Normales climatológicas por estado — Chihuahua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado?estado=chih>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., & Rosales, M. (2009). La larga sombra del ganado: problemas ambientales y opciones. https://www.researchgate.net/publication/273308193_La_Larga_Sombra_del_Ganado_Problemas_Ambientales_y_Opciones
- 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. <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.
- Wackernagel, M., & Rees, W. (2000). Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth. New Society Publishers.
- WMO. (1992). International conference on water and the environment: Development issues for the 21st century (Dublin statement and report of

the conference). World Meteorological Organization.
<https://www.ircwash.org/resources/international-conference-water-and-environment-development-issues-21st-century-26-31-0>

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2015). The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World. UNESCO.

Young, R. A. (2005). Determining the economic value of water: Concepts and methods. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781936331628>