



Huella hídrica azul directa en Guanajuato capital: diagnóstico de patrones de consumo y escenarios de gestión sostenible

Direct blue water footprint in Guanajuato City: diagnosis of consumption patterns and sustainable management scenarios

Ana Paula Cadena Plazas¹, Xitlali Virginia Delgado Galván² , José de Jesús Mora Rodríguez² ,
Eduardo Alexis Cervantes Carretero³ 

¹ Maestría en Ciencias del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México

² Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México

³ Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, México.

Resumen

Este estudio evalúa la Huella Hídrica Azul Directa (HHAD) del sistema de abastecimiento en Guanajuato Capital (2019-2024) analizando la interacción entre las fuentes de agua superficiales y subterráneas bajo condiciones climáticas estacionales. Utilizando la metodología de la Water Footprint Network, se consideró la extracción de agua, la evaporación y eficiencia física. La HHAD media anual fue de aproximadamente 10 millones de m³. Los resultados revelan disparidades de consumo entre zonas urbanas y estaciones, evidenciando una mayor presión sobre las fuentes subterráneas durante los periodos secos. El análisis de escenarios demuestra que la integración de mejoras en la eficiencia técnica y la reducción de la demanda puede disminuir la HHAD hasta en un 21.73%. Estos resultados confirman que la combinación de ambas medidas optimiza el aprovechamiento del recurso y alivia significativamente la presión sobre el acuífero Silao-Romita.

Palabras clave: HHAD, abastecimiento urbano, sostenibilidad hídrica, variabilidad climática.

Abstract

This study assesses the Direct Blue Water Footprint (DBWF) of the water supply system in Guanajuato City (2019–2024) by analyzing the interaction between surface water and groundwater sources under seasonal climatic conditions. Using the Water Footprint Network methodology, the study considered water abstraction, evaporation, and physical efficiency. The average annual DFWF was approximately 10 million m³. The results reveal consumption disparities between urban areas and seasons, indicating greater pressure on groundwater sources during dry periods. The scenario analysis demonstrates that integrating improvements in technical efficiency with demand reduction can reduce the HHAD by up to 21.73%. These results confirm that combining both measures optimizes resource use and significantly alleviates pressure on the Silao-Romita aquifer.

Keywords: DBWF, water supply, Guanajuato, water sustainability, climate variability

Introducción

El agua es uno de los recursos naturales más esenciales para la vida, el bienestar humano y el desarrollo económico. Sin embargo, su disponibilidad se ve cada vez más amenazada por retos globales como el crecimiento demográfico, la urbanización y el cambio climático (UNESCO, 2023). En México, donde el 79% de la población reside en zonas urbanas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2019), las ciudades ejercen una inmensa presión sobre los recursos hídricos, particularmente en regiones semiáridas como Guanajuato. Guanajuato Capital, enfrenta una aguda escasez de agua debido a la sobreexplotación de 19 de los 20 acuíferos estatales. El sistema

de abastecimiento de agua de Guanajuato Capital y a la dependencia de fuentes de agua superficiales variables,

Historial

Manuscrito recibido: 31 de octubre de 2025

Manuscrito aceptado: 27 de abril de 2026

Manuscrito publicado: agosto 2026

✉ Autor para correspondencia

Ana Paula Cadena Plazas
ap.cadenaplazas@ugto.mx

Como citar

Cadena Plazas AP, Delgado Galván XV, Mora Rodríguez JJ, Cervantes Carretero EA (2026). Huella hídrica azul directa en Guanajuato capital: diagnóstico de patrones de consumo y escenarios de gestión sostenible. *Ciencia Nicolaita* 97:89-98. DOI:[10.35830/cn.vi97.931](https://doi.org/10.35830/cn.vi97.931)

que están fuertemente influenciadas por los patrones de precipitación estacional.

La huella hídrica azul (HHA), definida como el volumen de agua dulce extraída de fuentes superficiales y subterráneas para uso humano (Hoekstra *et al.*, 2011), proporciona un marco para evaluar el consumo de agua y sus impactos ambientales. En Guanajuato Capital, aproximadamente el 70% del suministro de agua proviene de acuíferos, los cuales están experimentando un descenso en los niveles freáticos (CONAGUA, 2016). Esta sobreexplotación, junto con la variabilidad de las precipitaciones provocada por el clima, agrava el estrés hídrico, especialmente durante los meses secos, cuando el agua subterránea se convierte en la principal fuente (Martínez & Patiño, 2012). El sistema de abastecimiento de agua de la ciudad, gestionado por el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG), depende de tres embalses (La Soledad, La Esperanza y Mata) y una batería de 22 pozos en la zona de Puentecillas, que se alimentan del acuífero Silao-Romita. Este estudio tiene como objetivo evaluar el HHAD del sistema de abastecimiento urbano de Guanajuato Capital de 2019 a 2024, enfocándose en las contribuciones de las fuentes superficiales y subterráneas bajo variaciones climáticas estacionales

Marco conceptual y antecedentes

La creciente escasez de agua mundial, intensificada por la rápida urbanización y el cambio climático, hace que la gestión sostenible del agua urbana sea una necesaria para el desarrollo sostenible (Rosińska *et al.*, 2024). El concepto de HH, introducido por Hoekstra *et al.*, 2011, proporciona un marco global para evaluar el uso del agua, que abarca componentes directos (consumo local) e indirectos (agua virtual incorporada en bienes y servicios). La HHA, que se centra en el agua dulce extraída de fuentes superficiales y subterráneas, es especialmente pertinente para la gestión del agua urbana, ya que cuantifica la presión directa sobre los recursos hídricos locales.

Estudios de HH en contextos urbanos

Las proyecciones indican que la demanda de agua urbana aumentará en un 80% (UNESCO, 2023) impulsada por la urbanización y el crecimiento económico. En las regiones semiáridas, esta demanda se ve agravada por la limitada disponibilidad de agua y las tasas de evaporación.

El marco de la HH se ha aplicado ampliamente a los entornos urbanos. Estudios como el de Alifujiang *et al.*, (2024) en ciudades chinas proponen un modelo de desacoplamiento para evaluar la relación entre el crecimen-

to económico y el uso del agua, haciendo hincapié en la necesidad de una gestión eficiente del agua. Del mismo modo, Gong *et al.*, (2023) demostraron reducciones en las huellas hídricas urbanas a través de un mejor control de la contaminación, subrayando la importancia de las intervenciones políticas.

Fialkiewicz *et al.*, (2018) propusieron un modelo para evaluar la HHA en las ciudades europeas, incorporando la evaporación de las superficies impermeables y las pérdidas por distribución. Sus hallazgos destacan el papel de la morfología urbana en el consumo de agua, con superficies impermeables que aumentan significativamente la HHA. Manzardo *et al.*, (2016) refinaron este enfoque desagregando las áreas urbanas en bloques homogéneos, lo que permite intervenciones específicas. Estos estudios subrayan la importancia de los datos locales para realizar evaluaciones precisas de la HHA. En México, Morales-Novelo & Rodríguez-Tapia, (2020) analizaron la HH del Valle de México, revelando patrones de consumo insostenibles debido a la alta urbanización. Ramos-Bueno *et al.*, (2024) examinaron las variaciones espacio-temporales de la HH de la Ciudad de México, identificando zonas de alto consumo para su gestión específica. Esquivel Alcántara *et al.*, (2024) se centraron en el uso residencial del agua en Toluca, destacando el impacto de los hábitos cotidianos en la HHA. Estos estudios proporcionan una base para comprender las huellas hídricas urbanas en México, en particular en las regiones semiáridas.

Gestión del agua en Guanajuato

El sistema de abastecimiento de agua de Guanajuato Capital se caracteriza por una gran dependencia de las aguas subterráneas, lo cual es consistente con lo reportado para diversas ciudades mexicanas con limitada disponibilidad de fuentes superficiales. El acuífero Silao-Romita, del cual se extrae una parte significativa del suministro de la ciudad, se encuentra en estado de sobreexplotación. Presenta un déficit de 120 millones de metros cúbicos de agua al año, posicionándose como el quinto acuífero con mayor sobreexplotación en el estado de Guanajuato, lo que provoca un descenso en los niveles freáticos y un aumento en los costes de extracción (Caldera Ortega & Tagle Zamora, 2020).

El agua superficial de los embalses (La Soledad, La Esperanza y Mata) está limitada por la variabilidad estacional. Las eficiencias de distribución del 68%, con una tasa de pérdida del 32%, agravan aún más el estrés hídrico. Estos retos ponen de manifiesto la necesidad de realizar una evaluación detallada de la HHAD para fundamentar estrategias de gestión sostenibles.

Materiales y métodos

El presente estudio sigue la metodología de la Water Footprint Network para la evaluación de la Huella Hídrica Azul Directa (HHAD), adaptada al contexto urbano de Guanajuato capital. El periodo de análisis es de los años 2019 al 2024, realizando una desagregación mensual, sectorial y tarifaria, diferenciando los meses húmedos y secos según los registros de precipitación obtenidos de estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional. De SIMAPAG se obtuvieron datos detallados sobre el consumo mensual de agua, así como los volúmenes de extracción de agua subterránea de la batería de pozos de Puente-cillas y de extracción superficial de las presas. También se consideró la eficiencia de distribución del agua sectorial. Por otro lado, se obtuvo del Servicio Meteorológico Nacional datos climáticos incluyendo precipitación, temperatura y evaporación, registrados en las estaciones 11007, 11024, 11137 y 11141 y se complementó con imágenes satelitales del satélite Sentinel- 2 para las estimaciones de evaporación.

Zona de estudio

Guanajuato Capital se localiza en el centro de México (20°41'N, 100°46'O) dentro de la región hidrológica Lerma- Chapala-Santiago RH-12 (**Figura 1**). La ciudad se encuentra en la subcuenca Lerma-Salamanca, caracterizada por un clima semiárido (Köppen BSk) con una temperatura media anual de 18°C y una precipitación de 650 mm, concentrada en junio-septiembre (INEGI, 2022).

El sistema de abastecimiento de agua incluye tres presas con capacidad de (La Soledad: 4.6 hm³, La Esperanza: 0.75 hm³, Mata: 1.2 hm³) y el sistema de pozos Puente-cillas (**Figura 2** y **3**). Cada zona de la ciudad se abastece de un diferente tipo de fuente, como se puede observar en la **Figura 4**, la mayor parte de la ciudad, la zona verde, se abastece de los pozos de Puente-cillas. La zona amarilla y azul se abastecen de las presas de La Soledad, Esperanza y Mata, sin embargo, la zona naranja es una zona transitoria, es decir, dependiendo de la disponibilidad de agua de las presas, se abastece de Esperanza y Soledad o de pozos (**Figura 4**).

Datos utilizados

La HHAD se calculó conforme a la ecuación ajustada al contexto del sistema urbano de abastecimiento de Guanajuato capital (1):

$$HHAD = Q_{subt} + Q_{sup} + E_{embalses} - Q_{ret} \quad (1)$$

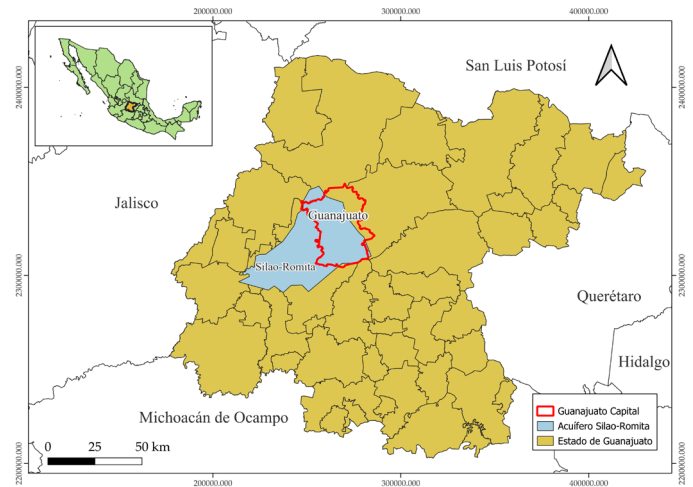


Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Guanajuato y el acuífero Silao-Romita.

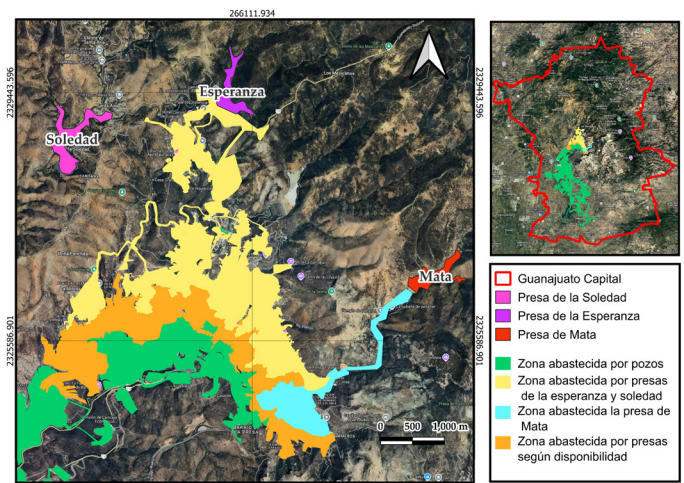


Figura 2. Ubicación de las presas que abastecen Guanajuato capital.

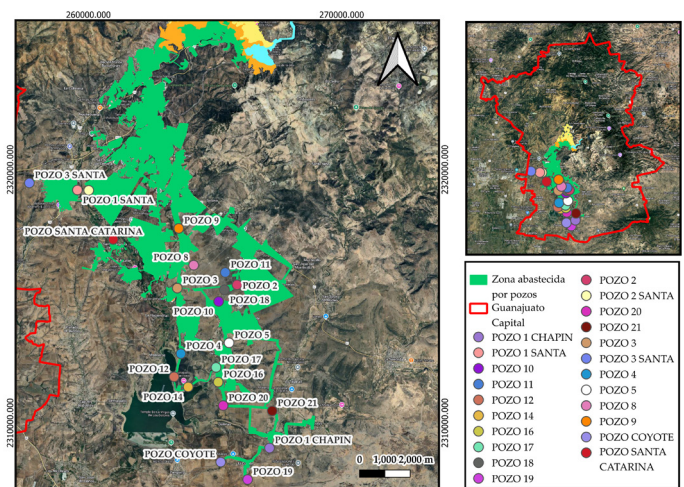


Figura 3. Ubicación de la batería de pozos de Puente-cillas.

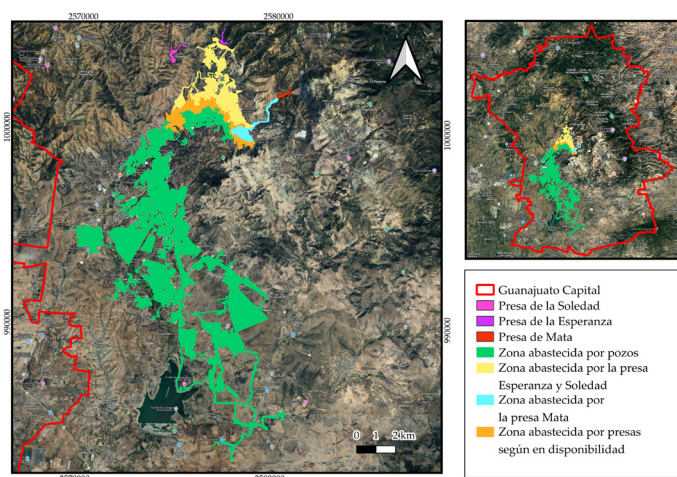


Figura 4. Abastecimiento de las fuentes a las zonas de la ciudad.

Donde, Q_{subt} corresponde a los volúmenes mensuales extraídos de los pozos de Puenteillas y Santa Teresa reportados por el organismo operador, y Q_{sup} son los volúmenes captados de presas para consumo urbano. Finalmente, se incorpora el volumen perdido por evaporación $E_{embalses}$ y se define el volumen retornado Q_{ret} como cero, debido a que el flujo no regresa a la cuenca original de extracción.

Los meses se clasificaron como húmedos (>80 mm de precipitación) o secos en función de los registros históricos de 2019-2024. Los datos se analizaron mensual y anualmente para captar la variabilidad estacional e interanual.

Estimación de evaporación mediante imágenes satelitales

Con el fin de evitar la sobreestimación de la evaporación en los cuerpos de agua, se utilizaron imágenes satelitales de satélite Sentinel-2 MSI (MultiSpectral Instrument), con una resolución espacial de 10 m para cada mes del periodo de estudio.

Se aplicó un filtrado de nubes mediante la banda SCL y posteriormente se aplicó el Índice Normalizado de Diferencia de Agua (NDWI) con un umbral de 0.1 para diferenciar los píxeles de agua del resto de la superficie. Con estos elementos se calculó el área total (m^2) del espejo de agua para cada cuerpo de agua. La evaporación se calculó con la ecuación (2)

$$E = A_{mensual} * e_p$$

Donde $A_{mensual}$ es el área del espejo de agua (m^2) y e_p la evaporación potencial mensual (mm) obtenida del SMN.

Tabla 1. Consumo anual en Guanajuato capital (2019-2024)

Año	Consumo total (m^3)
2019	6,484,828
2020	6,120,120
2021	6,223,344
2022	6,151,114
2023	6,441,321
2024	6,143,140

Resultados

Patrones de consumo de agua

El consumo anual de agua oscila entre 6.12 millones de m^3 en 2020 y 6.48 millones de m^3 en 2019 (**Tabla 1**). El consumo diario per cápita varía de 82 a 139 L/hab/día, con picos en los meses secos (por ejemplo, marzo de 2020: 139,9 L/hab/día) y valores más bajos en los meses húmedos (por ejemplo, junio de 2021: 90,9 L/hab/día).

En la **Figura 5** se puede observar el comportamiento de consumo a lo largo del periodo de estudio, los valores más altos se registran principalmente en marzo y agosto, coincidiendo con los meses secos y de mayor temperatura.

El análisis sectorial permite identificar como es la distribución espacial del consumo en los 35 sectores de Guanajuato capital. La sectorización surge como una estrategia de gestión en la red de distribución, esto consiste en dividir la red en zonas independientes, delimitadas por válvulas. En cada sector se controla el caudal suministrado mediante dispositivos de medición y a su vez, la presión suministrada en dichos puntos (Gómez-Martínez *et al.*, 2017).

El consumo total está dominado por un grupo reducido de sectores. Los cinco principales sectores concentran más del 41% de la demanda total del periodo, siendo Mata el principal sector de consumo, consumiendo el 13% del volumen total. Filtros8-12-10-10 es el segundo sector con más consumo, con una participación del 10.2% (**Figura 6**).

La distribución del consumo sectorial a lo largo del periodo de estudio fue estable, como se puede observar en la **Figura 7**, concentrándose los mayores consumos en el centro de la ciudad (colores rojos) y los sectores de las zonas del sur presentan consumos más bajos. La demanda elevada se asocia a áreas con mayor densidad de tomas, actividad comercial y de servicios. La similitud del consumo en el periodo de estudio indica que la demanda de agua mantiene una configuración territorial fija.

El consumo normalizado (L/toma/año) permite iden-

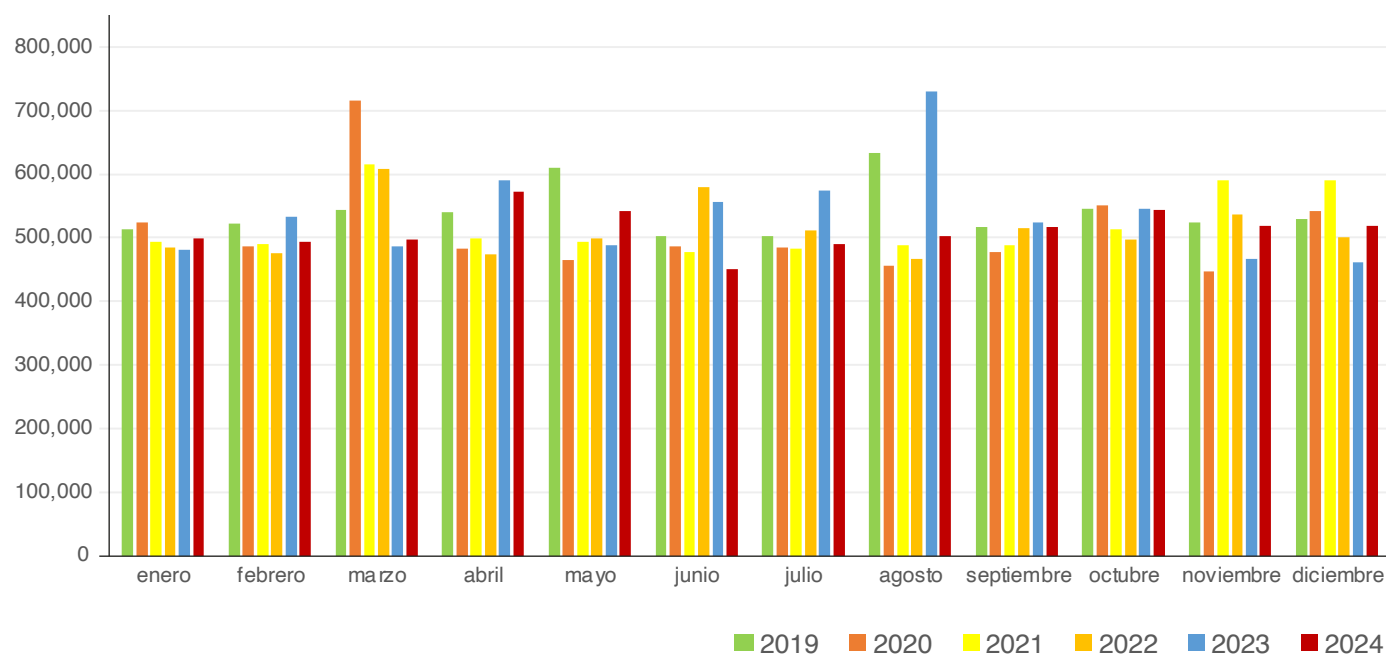


Figura 5. Distribución de consumo mensual en m³.

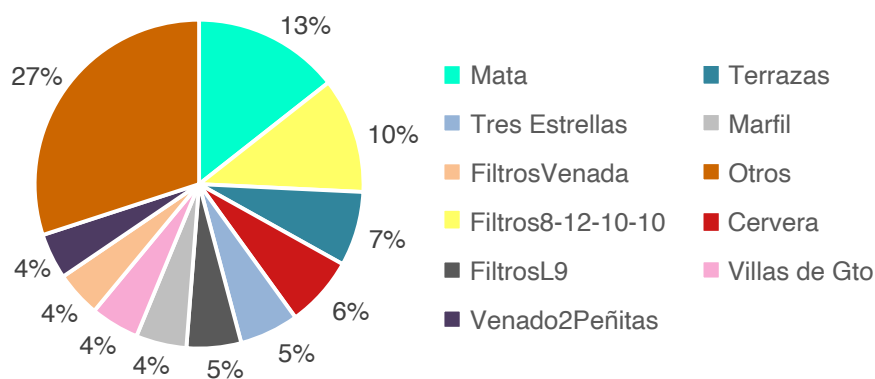


Figura 6. Distribución porcentual del consumo sectorial.

tificar patrones que no dependen del número de conexiones, sino del comportamiento del consumo individual. En general, en sectores residenciales como Cervera, Tres Estrellas y Mata tienen valores de consumo dentro del promedio (100,000–150,000 L/toma/año), haciendo un uso regulado y eficiente, sin embargo, se identifican anomalías en sectores con pocas tomas y grandes volúmenes de consumo, como es el caso de Manantial, Villas de Guanajuato y Santa Teresa, al sur de la ciudad y principalmente residenciales, con consumos de más de 800,00 L/toma/año (**Figura 8**). Esto refleja la necesidad de detectar consumos atípicos y planificar acciones de eficiencia en los sectores donde ocurre este fenómeno.

Estimación de la evaporación

La evaporación anual combinada de las tres presas en el periodo de estudio varía entre 0.51 y 0.64 millones de

metros cúbicos por año, equivalente al 4–5 % del volumen total de agua utilizada para el abastecimiento urbano. Las presas Soledad y Mata registran las mayores tasas de evaporación, debido a su mayor superficie expuesta y a su ubicación. En la **Figura 9** se puede observar comparación visual del índice NDWI en un mes seco (mayo) y un mes húmedo (julio) de 2024 donde se puede observar cómo varía el espejo de agua.

Cálculo de la HHAD

Los datos analizados para los años 2019 a 2024 revelan que la HHAD de Guanajuato capital oscila anualmente alrededor de los 9.62 y 11.12 millones de metros cúbicos, mostrando una clara influencia de la estacionalidad climática. El año 2023 presenta el valor más alto (11.12 Mm³), mientras que 2021 registra el menor (9.62 Mm³). Esta oscilación responde principalmente a la variabilidad

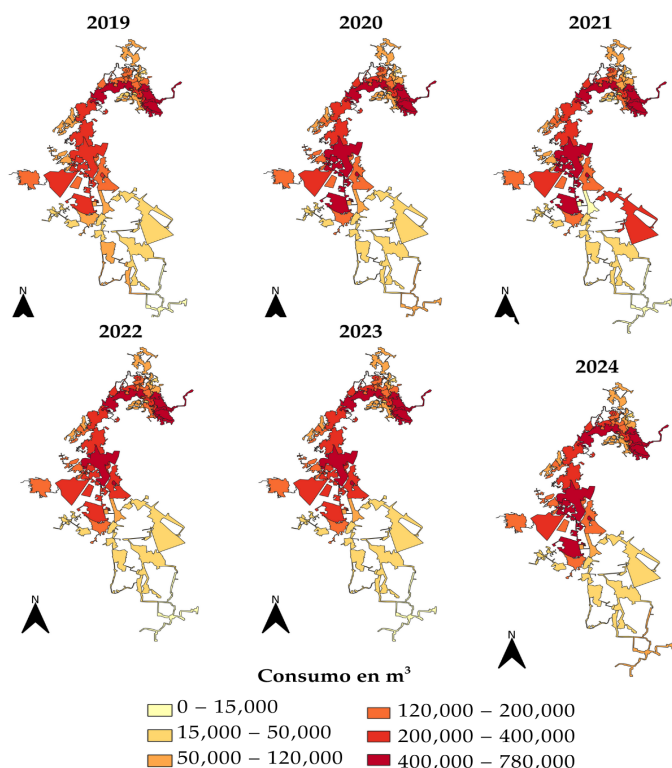


Figura 7. Consumo total por sector ($\text{m}^3/\text{año}$) en Guanajuato capital del 2019-2024.

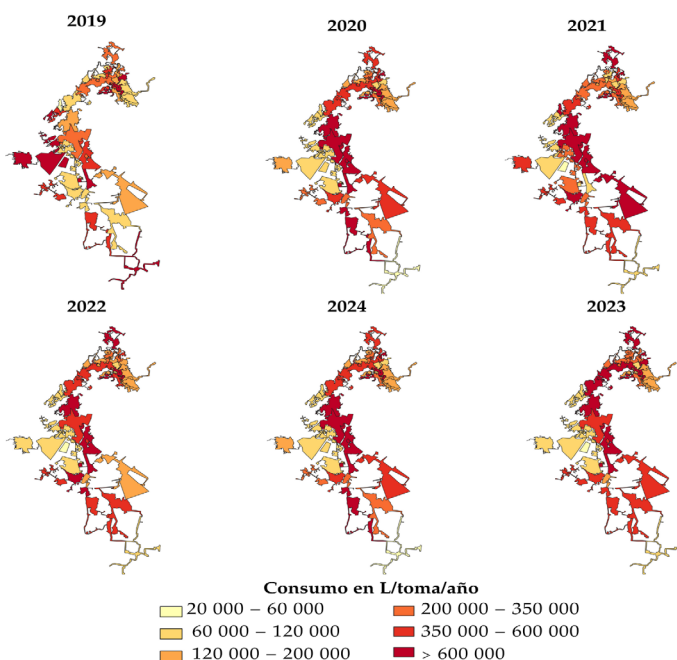


Figura 8. Consumo normalizado por sector ($\text{L}/\text{toma}/\text{año}$) en Guanajuato capital del 2019-2024.

en la precipitación, la temperatura y la disponibilidad de agua superficial en las presas que abastecen a la ciudad (Tabla 2).

Tabla 2. HHAD anual (2019-2024)

Año	HHAD (Mm^3)
2019	10.38
2020	10.33
2021	9.62
2022	10.79
2023	11.12
2024	10.44

Caracterización estacional (meses húmedos vs. secos)

Con el fin de lograr una comprensión más clara y detallada de la variabilidad de la HHAD, se llevó a cabo una clasificación de los meses en dos grandes categorías: húmedos y secos. Para esta clasificación, se estableció como criterio que un mes fuera considerado húmedo cuando su precipitación mensual superara la media anual de cada año en específico, en la **Figura 10** se puede observar la clasificación. De acuerdo con este criterio, los meses de junio, julio, agosto y septiembre fueron clasificados como húmedos, mientras que el resto del año fue clasificado como meses secos. Esta clasificación es coherente con el comportamiento climático característico de la región, en el cual la mayor parte de la precipitación anual ocurre durante el verano, correspondiente al periodo de lluvias en el centro de México. Para una mejor comprensión de la variabilidad de la HHAD, se clasificaron los meses en dos categorías: húmedos y secos.

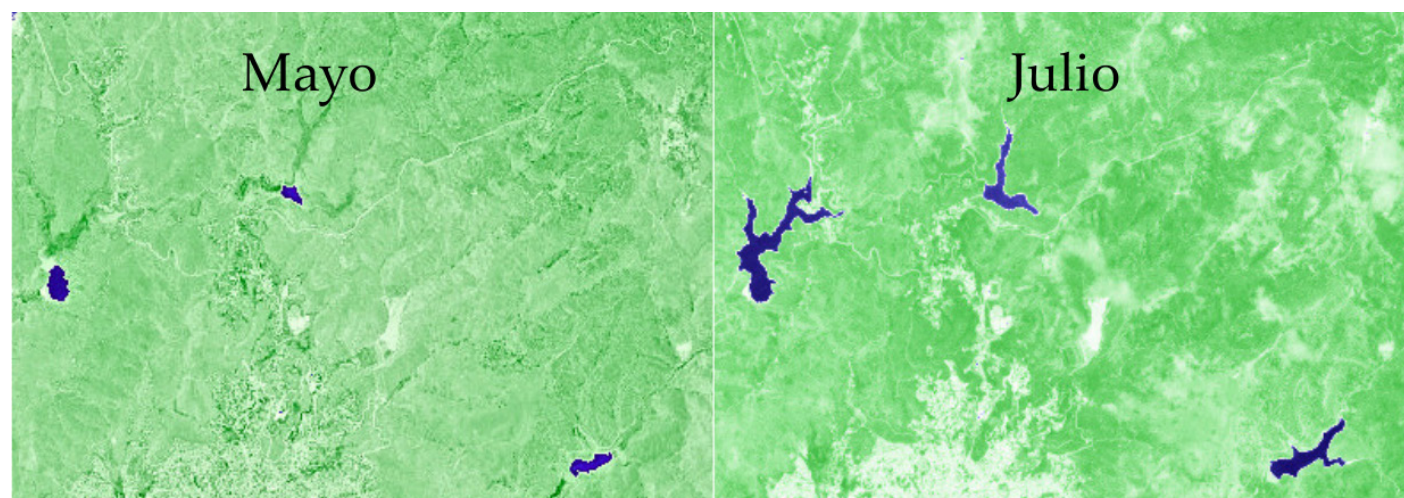
El análisis mensual evidencia la marcada estacionalidad del sistema, los picos más altos de HHAD se presentaron en los meses secos (marzo, abril, mayo, octubre, noviembre y diciembre), mientras que las reducciones más pronunciadas ocurrieron en los meses húmedos (junio a septiembre), cuando las presas aportaron mayores volúmenes y disminuyó la presión sobre los pozos.

En los seis años analizados, los meses de marzo y abril concentran los mayores valores mensuales de huella hídrica, alcanzando hasta 1.03 Mm^3 en 2022 y 0.99 Mm^3 en 2020, respectivamente. En contraste, los meses de julio y septiembre mostraron los valores más bajos, con promedios de $0.83\text{--}0.86 \text{ Mm}^3$, coincidiendo con el periodo de lluvias y la mayor recarga natural de los embalses.

Asimismo, el descenso en la HHAD de 2021 se explica por una mejor disponibilidad superficial y una gestión más equilibrada entre fuentes, mientras que los repuntes de 2022 y 2023 reflejan un aumento del consumo y mayor evaporación en años de déficit pluviométrico. Como se puede observar en la **Figura 10**, a menor precipitación, mayor huella hídrica azul directa.

Tabla 3. Clasificación de meses húmedos y secos en (mm)

Mes/Año	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Enero	0	2.35	2.925	0.33	0.5	1.31
Febrero	0.45	30.925	0	1.37	0	15
Marzo	3.7525	16.65	0	0.33	4.95	6
Abril	0	40.35	4	11.27	3.3	0
Mayo	27.45	71.575	147.25	3.43	26.75	1.01
Junio	150.225	140.15	120.95	26.63	24.75	149.41
Julio	174.65	198.075	147.45	122.07	91	212.39
Agosto	146.4	127.525	214.75	247.03	197.95	81.27
Septiembre	123.125	88.225	250.73	67.53	25.65	154.9
Octubre	47	2.875	33.53	37.1	30.3	0.42
Noviembre	4.5	6.275	1.77	5.03	17.65	0.83
Diciembre	6.2	1.275	1.83	4.8	39.65	0.25
Precipitación Acumulada	683.753	726.25	925.192	526.933	462.45	622.793


Figura 9. Comparación con el NDWI del área del espejo en las presas en un mes seco y húmedo respectivamente, del año 2024.

Escenarios de gestión: reducción potencial de HHAD y costos (2024)

Con base en los patrones de consumo, la contribución de las fuentes y la eficiencia física sectorial, se plantean escenarios aplicados al año 2024 que buscan estimar en qué medida la implementación de mejoras en eficiencia física y disminución del consumo doméstico podrían disminuir el volumen de extracciones requerido y así, reducir la HHAD del sistema de abastecimiento. Los escenarios se enfocan en la mejora de la eficiencia física y la reducción de la demanda.

Escenario 1: Mejora de eficiencia física (+10 puntos porcentuales)

Con base en los patrones de consumo, la contribución de las fuentes y la eficiencia física sectorial, se plantean

escenarios aplicados al año 2024 que buscan estimar en qué medida la implementación de mejoras en eficiencia física y disminución del consumo doméstico podrían disminuir el volumen de extracciones requerido y así, reducir la HHAD del sistema de abastecimiento. Se mantiene constante el consumo anual por sector (V_{cons}) y se incrementa la eficiencia (η) en 10 puntos porcentuales. El volumen de entrada requerido se calcula con la ecuación (2) y el ahorro volumétrico con la ecuación (3), donde ($V_{ent,in}$) es el volumen de entrada inicial y ($V_{ent,fn}$) es el volumen de entrada final.

$$V_{ent} = \eta / V_{cons} \quad (2)$$

$$\Delta V = V_{ent,in} - V_{ent,fn} \quad (3)$$

Tabla 4. Escenarios de gestión para Guanajuato Capital.

Escenario	Ahorro total del sistema (m³/año)	Reducción HHAD (%)	Volumen evitado en pozos (m³/año)	Ahorro total (MXN/año)
+10 pp eficiencia	1,336,682	12.81	1,037,100	8,631,905
−10% consumo	970,357	1.28	752,877	6,266,284
Combinado	2,173,371	20.83	1,686,267	14,035,000

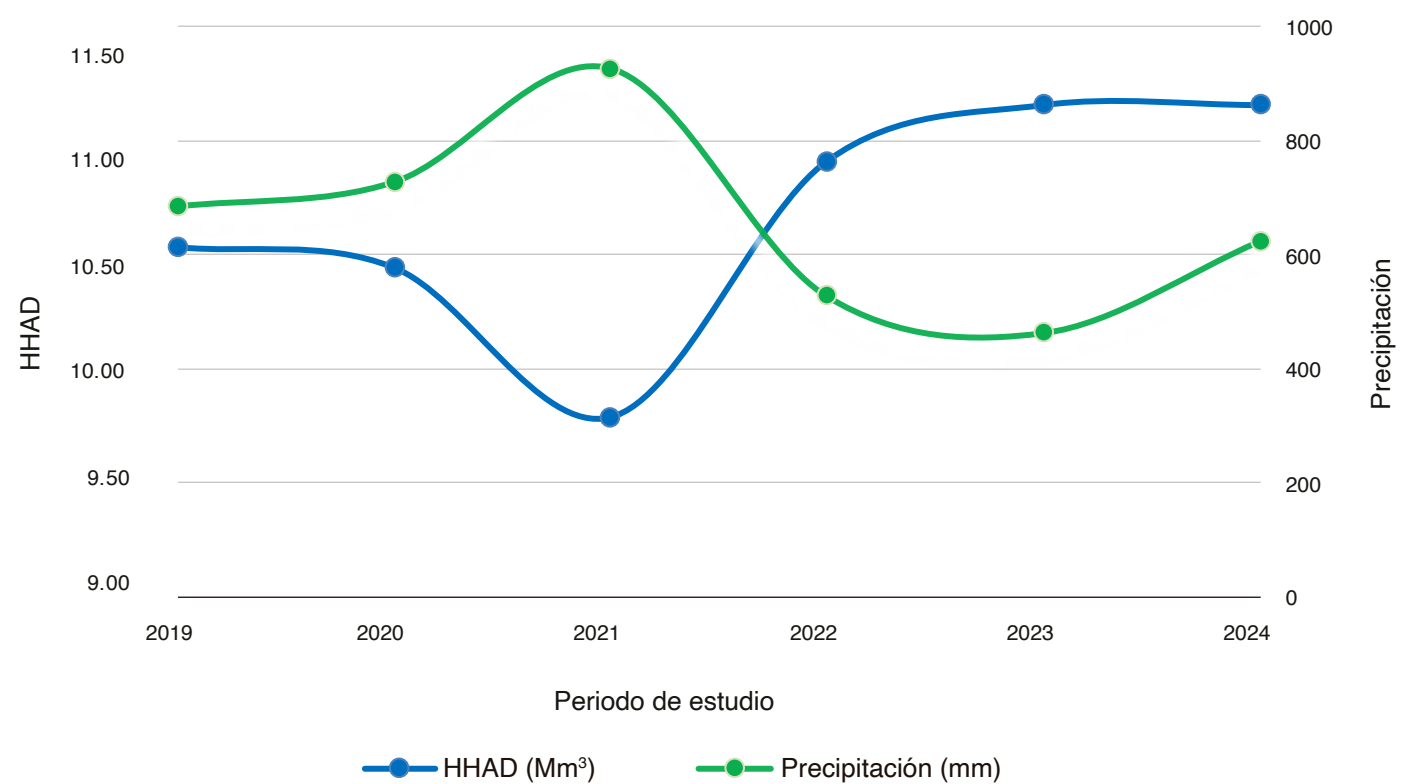


Figura 10. Relación de HHAD con la precipitación en el periodo de estudio.

Escenario 2: Reducción de consumo (−10%)

Se mantiene constante (η) y se reduce el consumo sectorial en un 10% con la ecuación (4). El ahorro se calcula por diferencia del volumen de entrada.

$$V_{cons,fn} = 0.9V_{cons,in} \tag{4}$$

Escenario 3: Combinado

Integra simultáneamente el aumento de eficiencia física (+10 pp) y la reducción de consumo (−10%). Los resultados muestran que la reducción de HHAD se concentra en la mejora de eficiencia física, consistente con la relevancia de las pérdidas en un sistema con eficiencia media cercana al 68%. En términos agregados, el escenario combinado presenta el mayor impacto.

Adicionalmente, se estima el ahorro monetario anual asociado a la reducción de extracción subterránea, utilizando costos unitarios de operación reportados para po-

zos, cárcamos y tanques. El volumen evitado en aguas subterráneas se calcula con la ecuación (5).

$$V_{subt,esc} = V_{tot,esc} f_{subt} \tag{5}$$

Donde $V_{tot,esc}$ es el volumen total ahorrado por escenario y f_{subt} es el porcentaje de agua subterránea extraído en 2024. El escenario combinado alcanza el mayor beneficio económico (≈ 14.0 millones MXN/año), dominado por el ahorro de energía eléctrica.

Discusión

La evaluación de la HHAD del sistema de abastecimiento de Guanajuato capital, ofrece un enfoque para entender no solo la cantidad de agua que se consume sino el impacto de los patrones de consumo sobre los recursos tanto super-

ficiales como subterráneos. La HHAD se mantiene en un rango entre 9 y 11 millones de m³/año, esto evidencia una mayor presión sobre las fuentes subterráneas en los periodos secos, cuando la disponibilidad de agua superficial se reduce y el sistema depende en mayor medida del bombeo de pozos, como ha sido documentado en otros contextos urbanos (Ramos-Bueno *et al.*, 2024). Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas de abastecimiento de regiones semiáridas mediterráneas, donde la demanda urbana se intensifica durante los periodos de baja disponibilidad hídrica, incrementando la dependencia de las reservas subterráneas y agravando el estrés sobre los acuíferos (Nydrioti *et al.*, 2024).

En este contexto, la gestión eficiente del sistema de distribución adquiere un papel importante. La sectorización hidráulica es reconocida como una herramienta eficaz para localizar áreas críticas y focalizar acciones de reducción de pérdidas y uso eficiente del agua (Manzardo *et al.*, 2016). Avances metodológicos recientes en el diseño de zonas de medición de distrito han demostrado que la optimización de la partición de redes mejora tanto el control de presiones como la detección de fugas no reportadas, contribuyendo a la reducción sostenida de los volúmenes de agua no contabilizada (Jazayeri & Moeini, 2024).

Por otra parte, el desazolve de presas se ha planteado como una alternativa para recuperar la capacidad de almacenamiento perdida y aumentar la disponibilidad de agua superficial, lo que en principio puede contribuir a reducir la presión sobre las extracciones subterráneas y, con ello, la HHAD. Sin embargo, diversos estudios señalan que los costos asociados a la remoción, transporte y disposición de sedimentos suelen ser elevados y, en muchos casos, comparables a los de la construcción de nueva infraestructura hidráulica, lo que limita su viabilidad económica como estrategia de gestión a largo plazo (Smith *et al.*, 2013). Asimismo, la movilización de sedimentos finos durante las labores de desazolve puede generar impactos ambientales, como el deterioro temporal de la calidad del agua y afectaciones a los ecosistemas acuáticos, lo que reduce su conveniencia en sistemas destinados al abastecimiento urbano (Kondolf *et al.*, 2014). Finalmente, este tipo de intervenciones suele enfrentar resistencias sociales y dificultades institucionales derivadas de la oposición comunitaria y de la complejidad regulatoria, lo que representa un obstáculo adicional para su implementación recurrente (Domínguez, 2019). Teniendo en cuenta estas limitaciones, se plantean escenarios de gestión basados en acciones que han sido efectivas en la literatura. La reducción de la extracción urbana, a través de mejoras en la eficiencia del sistema y la disminución de la demanda, ha sido identificada como una estrategia clave para incrementar la resiliencia frente a la

sequía, reducir el consumo energético y mejorar la sostenibilidad del abastecimiento urbano (Díaz-Cano *et al.*, 2025). En particular, el aumento de la eficiencia física de las redes de distribución ha mostrado resultados significativos en la reducción de pérdidas reales, donde la implementación de control de fugas, sectorización hidráulica y monitoreo integrado permitió disminuir las pérdidas de agua en un 17% (Akdeniz, 2022). Sumado a esto, la evaluación sistemática de indicadores mediante herramientas digitales permite orientar inversiones hacia redes con alto índice de agua no contabilizada (Berardi *et al.*, 2025), mientras que las campañas de concientización dirigidas a los usuarios han demostrado ser una herramienta eficaz para reducir el consumo doméstico en el corto plazo, logrando ahorros superiores al 17% en contextos urbanos europeos cuando se aplican mensajes específicos y contextualizados (Morbidelli *et al.*, 2025).

La realización continua de estudios sobre la HH y la dinámica del abastecimiento urbano es fundamental para fortalecer la gestión hídrica en ciudades expuestas a la variabilidad climática y a la sobreexplotación de acuíferos, como es el caso de Guanajuato capital. La integración de los componentes de la huella hídrica (azul, verde y gris), en evaluaciones a escala de cuenca urbana enriquecen el diagnóstico y permiten identificar con mayor precisión las zonas de intervención prioritaria (Maranan *et al.*, 2025). Este tipo de análisis ofrece una base para comprender cómo interactúan la demanda urbana, la disponibilidad superficial, las extracciones y la eficiencia del sistema, permitiendo anticipar escenarios de riesgo y priorizar medidas que reduzcan el impacto en la HHAD. Un análisis constante de los patrones de consumo y el monitoreo de los sectores ayudarán a tener una mejor gestión de los recursos hídricos, promoviendo una sostenibilidad del abastecimiento a largo plazo (Morales-Novelo & Rodríguez-Tapia, 2020).

Conclusiones

La Huella Hídrica Azul Directa (HHAD) del abastecimiento urbano de Guanajuato capital para el periodo 2019–2024 presenta un promedio de 10.45 Mm³/año, con un rango que va de 9.62 a 11.12 Mm³, reflejando una estabilidad relativa del sistema bajo condiciones climáticas contrastantes. La variabilidad estacional es el factor dominante: los meses secos concentran la mayor presión sobre los recursos hídricos debido al incremento en la demanda y la reducción de la aportación superficial.

Los análisis estadísticos y espaciales permiten identificar patrones de consumo y zonas de concentración (*hot*

spots) que representan oportunidades para implementar medidas de ahorro, detección de fugas y uso eficiente del agua.

Los análisis de gestión revelan que la HHAD tiene un potencial de reducción de entre el 9.70% y el 21.73% según las acciones implementadas. La optimización de la eficiencia física (+10 pp) se identifica como la intervención de mayor relevancia, con una recuperación estimada de 1,336,682 m³/año. Por su parte, la disminución del 10% en la demanda aporta un ahorro de 970,357 m³/año, mientras que la integración de ambas estrategias maximiza el beneficio hídrico al alcanzar los 2,173,371 m³/año. En conjunto, estos resultados confirman que implementar políticas integrales que sumen mejoras técnicas y estrategias de gestión de la demanda puede aliviar de manera significativa la presión sobre el acuífero y fortalecer la sostenibilidad del sistema de abastecimiento.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido llevada a cabo gracias al financiamiento otorgado por la Beca Nacional de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SE-CIHTI) y los datos proporcionados por el Sistema Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Guanajuato (SIMAPAG).

Referencias

Alifujiang Y, Lu N, Feng P, Jiang Y (2024). China's Urban Water Utilization Based on the Water Footprint Methodology. *Water (Switzerland)* 16(3). doi:10.3390/w16030462

Berardi L, Laucelli DB, Ripani S, Piazza S, Freni G (2025). Using water loss performance indicators to support regulation and planning in real water distribution systems. *Digital Water* 3(1). doi:10.1080/28375807.2025.2504342

Caldera Ortega AR, Tagle Zamora D (2020). *Agua en el bajo guanajuatense* (Primera edición). Universidad de Guanajuato.

CONAGUA (2016). Estadísticas del Agua en México, Edición 2016. In *Publicaciones Estadísticas y Geográficas. SINA*. doi:978-968-817-895-9

Domínguez J (2022) *Agua y saneamiento. Desafíos de la gobernanza de los sistemas públicos locales*. https://sitios.congresogto.gob.mx/juntanlace/assets/pdf/JDS_COLMEX.pdf

Esquivel Alcántara A, Salgado Vega MC, Esquivel Alcántara SE (2024). *Análisis comparativo de la Huella Hídrica de consumo en las viviendas de los municipios del Área Metropolitana de Toluca, 2023*. <http://ru.iiec.unam.mx/6446>

Fialkiewicz W, Burszta-Adamiak E, Kolonko-Wiercik A, Manzardo A, Loss A, Mikovits C, Scipioni A (2018). Simplified direct water footprint model to support urban water management. *Water (Switzerland)* 10(5). doi:10.3390/w10050630

Gómez-Martínez P, Cubillo-González F, Martín-Carrasco FJ (2017). Metodología para caracterizar la eficiencia de una red de distribución sectorizada. *Tecnología y Ciencias Del Agua* 8(4). doi:10.24850/j-tyca-2017-04-04

Gong B, Liu Z, Liu Y, Zhou S (2023). Understanding advances and challenges of urban water security and sustainability in China based on water footprint dynamics. *Ecological Indicators* 150. doi:10.1016/j.ecolind.2023.110233

Hoekstra AY, Chapagain AK, Aladaya MM, Mesfin M, Mekonnen. (2011). The water footprint assessment manual setting the global standard. In *Water Footprint Network*.

INEGI (2022). *Aspectos geográficos de Guanajuato: Compendio 2022*. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.htm?upc=889463914464>

Jazayeri P, Moeini R (2024). District metered areas determination for water distribution networks using improved Girvan–Newman algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(5). doi:10.1016/j.asej.2024.102676

Manzardo A, Loss A, Fialkiewicz W, Rauch W, Scipioni A (2016). Methodological proposal to assess the water footprint accounting of direct water use at an urban level: A case study of the Municipality of Vicenza. *Ecological Indicators* 69. doi:10.1016/j.ecolind.2016.04.016

Maranan C, Cruz G, Santos F (2025). Quantifying blue, green, and gray water footprints in a mixed land use urban catchment for sustainable urban water management. *Frontiers in Water* 7. doi:10.3389/frwa.2025.1655691

Martínez P, Patiño C (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 3(1).

Morales-Novelo JA, Rodríguez-Tapia L (2020). Water footprint sustainability at valley of Mexico's basin; [Sustentabilidad de la huella hídrica en la cuenca del valle de México]. *Tecnología y Ciencias Del Agua* 11(4).

Nydrioti I, Sebos I, Kitsara G (2024). Effective management of urban water resources under various climate scenarios in semiarid Mediterranean areas. *Scientific Reports* 14. doi:10.1038/s41598-024-79938-3

Ramos-Bueno A, Galeana-Pizaña JM, Perevochtchikova M (2024). Urban water consumption analysis through a spatial panel modeling approach: a case study of Mexico City, 2004–2022. *Water Supply* 24(9):3179–3195. doi:10.2166/WS.2024.191

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México, edición 2018. In *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México*.

UNESCO (2023). The United Nations World Water Development Report 2023. In *Handbook of Water Purity and Quality*.