

# Eje 3

---

## **Sostenibilidad y manejo de aguas**



# Capítulo 3.1

---

## **Evaluación económica y ambiental del tratamiento de aguas residuales en Durango: Un enfoque de desarrollo sostenible**

*Flores Montelongo Isela<sup>1</sup>  
Arcadia Peralta Edgar Antonio<sup>2</sup>  
Flores Vilchez Fernando<sup>3</sup>*

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20259464>



---

<sup>1</sup> Profesora del Instituto Tecnológico de Durango. e-mail: iselafm@yahoo.com.mx

<sup>2</sup> Profesor Investigador de la Universidad Autónoma de Nayarit. e-mail: edgar.arcadia@uan.edu.mx

<sup>3</sup> Profesor Investigador de la Universidad Autónoma de Nayarit. e-mail: vilchez@uan.edu.mx

## 1. Introducción

A nivel mundial, la transición hacia una gestión hídrica sostenible exige integrar enfoques de economía circular que prioricen la reutilización del agua, la recuperación energética y la reducción de vertidos sin tratar (OECD, 2025). En América Latina, aunque se han dado pasos importantes, la región enfrenta barreras técnicas, normativas y culturales que limitan la implementación plena de estos modelos (Farfán Chilicaus et al., 2025; Beckett, 2025). El caso de zonas áridas y semiáridas, como el norte de México, es particularmente crítico debido a la presión creciente sobre las fuentes hídricas por el cambio climático y la urbanización acelerada (Karimi et al., 2024). Estudios recientes señalan que la aplicación de tecnologías circulares innovadoras en esquemas de tratamiento puede incrementar la eficiencia de los sistemas suministradores del agua, mejorar la viabilidad financiera de los sistemas y fortalecer la resiliencia ante escenarios climáticos adversos (Awinia et al., 2025). Este contexto plantea la necesidad de desarrollar infraestructura hídrica inteligente, evaluada con indicadores de “water smartness” que permitan medir su contribución a la sostenibilidad y la adaptación climática (Bosco et al., 2025).

El informe más reciente de la Organización Mundial de la Salud estima que en 2024 el 56 % del flujo de aguas residuales domésticas fue tratado de manera segura, lo que significa que casi la mitad de las descargas aún no cumple con estándares de tratamiento (World Health Organization, 2025). Según la United Nations University – Institute for Water, Environment and Health (2024), la capacidad de tratamiento varía significativamente según el nivel de ingresos de las naciones: en las de ingresos altos se alcanza un 74 %, mientras que en las de ingresos bajos apenas llega al 4.3 %, con un promedio global del 52 %.

En América Latina y el Caribe, la situación es particularmente compleja: el 54 % del flujo doméstico de aguas residuales no recibe tratamiento

(OECD, 2025), en un contexto de urbanización acelerada, presiones crecientes sobre las fuentes hídricas y desigualdades en el acceso a infraestructura, lo que limita el avance hacia la meta 6.3 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Llevar a cabo una adecuada gestión del uso del agua es fundamental, especialmente en regiones que han experimentado escasez y contaminación, ya que optimizar este proceso conlleva una mayor sostenibilidad ambiental (Benstaali et al., 2024). El desarrollo y crecimiento de los países varía en la medida del suministro de agua (Hashem y Qi, 2021); sin embargo, fenómenos socioeconómicos como la sobrepoblación incrementan la demanda y agravan la escasez (Hussain et al., 2019). El agua es uno de los recursos naturales más afectados a lo largo del tiempo, y su disponibilidad y calidad son determinantes para mantener el equilibrio entre el desarrollo económico y ambiental de los países (Zhang et al., 2020) y preservar la salud de la población (Zuccarello et al., 2021). Es esencial en los procesos productivos y en la vida cotidiana, por lo que se debe evitar su sobreexplotación y mejorar su tratamiento.

En este escenario, muchos países de América Latina enfrentan alta escasez, contaminación y suministro inadecuado debido a la sobrepoblación, la mala planificación urbana y la desigualdad social. Un ejemplo claro es la Ciudad de México, caracterizada por una gestión ineficiente, insostenible y desigual del agua (García-Sánchez y Güereca, 2019), situación que se repite en la mayoría de los estados, lo que hace importante resaltar que una gestión adecuada de los recursos hídricos no solo protege la salud y los ecosistemas, sino que también impulsa el desarrollo económico y social.

México ha mostrado avances: el porcentaje de aguas residuales tratadas aumentó de 43.14 % en 2015 a 49.1 % en 2019 (United Nations Statistics Division, 2024), aunque persisten retos en zonas rurales y en la modernización de plantas para cumplir con normativas más estrictas. En este sentido, la ciudad de Durango ha realizado un gran esfuerzo para tratar el 100 % de sus aguas residuales, reconociendo la importancia de equilibrar el crecimiento urbano e industrial con la sostenibilidad ambiental. Sin embargo, el incremento en la generación de aguas residuales debido al desarrollo económico y demográfico exige reforzar la infraestructura

existente. Por ello, el proyecto de una nueva planta de tratamiento busca incrementar la capacidad futura del sistema, garantizando la calidad del agua, reduciendo impactos ambientales y asegurando la disponibilidad del recurso hídrico para las próximas generaciones. La intervención del Estado a través de regulaciones e incentivos financieros puede fomentar inversiones en infraestructura hídrica y reducir el impacto ambiental negativo.

A la par de estos retos estructurales, el cambio climático emerge como uno de los principales desafíos del siglo XXI, cuyos efectos se manifiestan con especial intensidad en la disponibilidad y calidad del agua. La alteración del ciclo hidrológico, el incremento de eventos extremos como sequías o lluvias intensas y la variabilidad térmica amenazan la sostenibilidad de los sistemas urbanos e infraestructuras hídricas. En este contexto, el tratamiento de aguas residuales adquiere una nueva dimensión: no solo como instrumento de saneamiento, sino como un componente estratégico para la mitigación y adaptación al cambio climático (IPCC, 2018; Ávila y Argueta, 2024).

En México, y particularmente en estados semiáridos como Durango, el desafío no radica solo en alcanzar cobertura de tratamiento, que en el caso del municipio ya es del 100 %, sino en modernizar y expandir las capacidades tecnológicas de sus plantas para responder a nuevas exigencias ambientales y climáticas. A pesar de este logro, persiste la necesidad de transitar hacia modelos de gestión hídrica más eficientes, resilientes y compatibles con los principios de economía circular y sostenibilidad a largo plazo.

Este capítulo analiza el caso del municipio de Durango, México, desde una perspectiva que articula los enfoques de economía ambiental y cambio climático y, a través de una evaluación económica y ambiental del proyecto de una nueva planta de tratamiento, se busca evidenciar cómo este tipo de infraestructura puede convertirse en un instrumento de resiliencia climática, alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (especialmente ODS 6, 11 y 13), así como con los compromisos nacionales en materia de cambio climático.

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar la viabilidad económica y ambiental del tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Durango como una estrategia de adaptación y mitigación ante el cambio climático,

mediante el análisis de costos, beneficios y externalidades asociados a la implementación de una nueva planta de tratamiento con tecnología avanzada y criterios de sostenibilidad hídrica.

## **1.1. Cambio climático y recursos hídricos urbanos**

El cambio climático ha intensificado los desafíos relacionados con la gestión del agua, especialmente en zonas áridas y semiáridas como el norte de México, ya que los efectos del calentamiento global como el aumento de temperaturas, la disminución de la precipitación efectiva y la mayor frecuencia de sequías impactan directamente en la disponibilidad y calidad del agua (IPCC, 2023) y la infraestructura hídrica urbana debe adaptarse a estos escenarios mediante soluciones que promuevan tanto la resiliencia como la mitigación, por lo que la gestión del agua ya no puede entenderse de forma aislada sino como un eje transversal para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento), el ODS 11 (ciudades sostenibles) y el ODS 13 (acción por el clima).

## **1.2. Infraestructura de tratamiento como estrategia de adaptación y mitigación**

Las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) han evolucionado de sistemas tradicionales de saneamiento a plataformas estratégicas de recuperación de recursos y mitigación climática, con tecnologías emergentes como los reactores de membrana, el aprovechamiento de biogás, la generación de energía a partir de lodos y el reúso de agua tratada que permiten que estas infraestructuras contribuyan activamente a la reducción de gases de efecto invernadero (Ávila y Argueta, 2024; Faragò, 2022; Garrido-Baserba et al., 2020).

Cuando se integran con enfoques de soluciones basadas en la naturaleza, como humedales artificiales o infraestructura verde, las PTAR también ofrecen beneficios de adaptación al clima: aumentan la recarga hídrica, mejoran la calidad de los cuerpos receptores y reducen el riesgo de inundaciones (WWAP/UNESCO, 2018; Cassin y Locatelli, 2020).

### **1.3. Economía ambiental y circular del agua**

Desde el enfoque de economía ambiental, el tratamiento de aguas residuales puede evaluarse considerando no solo los costos financieros, sino también los beneficios ambientales y sociales asociados, como la mejora en la salud pública, la valorización de subproductos y la reducción del deterioro ambiental. Este análisis es clave para justificar inversiones públicas y privadas en infraestructura climáticamente inteligente (Azqueta, 2007).

En este contexto, la economía circular del agua se convierte en una estrategia clave para cerrar los ciclos del recurso mediante la reutilización, el reciclaje y la valorización de residuos. A pesar de los avances, aún persisten barreras operativas, normativas y culturales que limitan su implementación en América Latina (Sánchez et al., 2024). Herramientas como el Análisis de Ciclo de Vida (LCA), la Huella de Carbono (CFP) y el Análisis Costo-Beneficio (CBA) permiten cuantificar integralmente los impactos y beneficios de este tipo de proyectos (Fragò, 2022).

### **1.4. Gestión integrada y sostenibilidad hídrica en el contexto mexicano**

La Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) es un enfoque cada vez más relevante en México, donde se busca combinar eficiencia técnica, equidad social y sostenibilidad ambiental, y exige modelos de gobernanza que integren a actores múltiples: gobierno, sociedad, sector privado y academia, para garantizar soluciones de largo plazo. En este marco, la evaluación de proyectos como nuevas plantas de tratamiento debe incorporar indicadores ambientales, sociales y económicos, así como variables climáticas futuras, de manera que se favorezcan decisiones resilientes y costoefectivas (Navarro et al., 2020).

#### *a) Contabilidad ambiental*

La contabilidad ambiental busca integrar los costos ecológicos en los análisis financieros de proyectos de infraestructura hídrica. Este enfoque permite medir la sostenibilidad de los recursos naturales, evaluar la

eficiencia de los sistemas de tratamiento de aguas y diseñar estrategias para la gestión del agua a largo plazo (Obst et al., 2015). El capital natural, entendido como el stock de recursos hídricos disponibles para su uso, juega un papel fundamental en la planificación de políticas de tratamiento de aguas residuales (Dasgupta, 2021). La implementación de estrategias de contabilidad ambiental, como el cálculo de la huella hídrica y la depreciación ecológica, ha sido propuesta como una alternativa viable para mejorar la sostenibilidad de los sistemas de saneamiento (Lange et al., 2018).

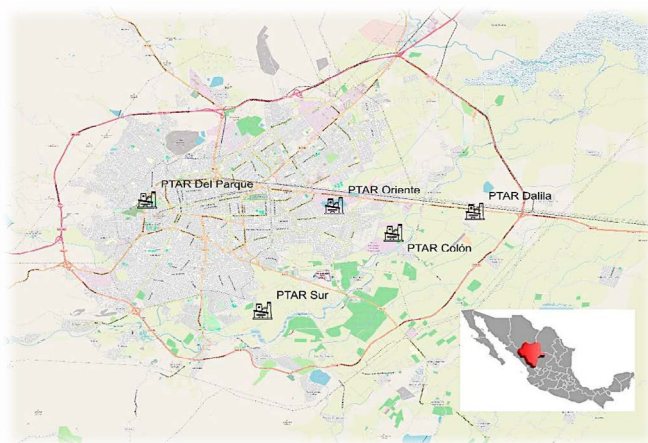
En el caso del proyecto de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), la aplicación de la contabilidad ambiental permite incorporar el costo del deterioro ambiental, los beneficios de la reducción de contaminación y la economía circular derivada del uso eficiente del agua tratada. Según Delacore y Martínez (2021), la contabilidad ambiental en proyectos hídricos debe considerar la valorización del recurso agua y los costos externos asociados con la degradación de ecosistemas acuáticos.

#### *b) Tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Durango*

El sistema de tratamiento de aguas residuales en Durango cuenta con cinco plantas que, en conjunto, tienen una capacidad instalada de 2,550 litros por segundo (l/s). Cada una de estas plantas opera con diferentes tecnologías y niveles de eficiencia. Según los análisis más recientes, la calidad del agua tratada en estas instalaciones cumple con la normatividad vigente, ya que los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO5) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) se encuentran dentro de los límites permitidos (AMD, 2024) (Figura 1).

**Figura 1**

*Mapa de ubicación de las plantas de tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Durango*



*Fuente: Elaboración propia*

#### *c) Planta de Tratamiento Oriente*

Esta planta opera bajo un sistema de lagunas aireadas, y está diseñada con una capacidad de 2 000 l/s, de los cuales actualmente procesa 1 650 l/s, y su principal función es tratar aguas residuales de origen doméstico, destinando el efluente tratado a actividades agrícolas, procesos industriales y riego de jardines (AMD, 2024).

#### *d) Planta de Tratamiento Sur*

Utiliza un sistema de lodos activados y cuenta con una capacidad de diseño de 400 l/s, aunque en la actualidad trata 350 l/s, cuya agua depurada proviene de fuentes domésticas y se reutiliza en riego agrícola y de jardines (AMD, 2024).

e) *Planta de Tratamiento Cristóbal Colón*

Esta planta también opera con el método de lodos activados, con una capacidad instalada de 100 l/s; sin embargo, actualmente solo procesa el 50 % de su capacidad, es decir, 50 l/s. El agua tratada se destina a la irrigación agrícola (AMD, 2024).

f) *Planta de Tratamiento del Parque*

Con una capacidad de diseño de 30 l/s, esta planta opera con un sistema de lodos activados y actualmente trata un volumen de 20 l/s. Su efluente se destina al riego de cultivos y otras actividades agrícolas (AMD, 2024).

g) *Planta de Tratamiento Dalila*

Diseñada para operar con lodos activados, esta planta tiene una capacidad de 20 l/s. No obstante, debido a la baja disponibilidad de caudal, en la actualidad se encuentra prácticamente fuera de operación (AMD, 2024) (Tabla 1).

**Tabla 1**  
*Plantas de Tratamiento de Aguas residuales en la ciudad de Durango*

| Nombre PTAR     | Tipo de tratamiento                  | Tipo de planta   | Inicio de operación | Capacidad de diseño (l/s) | Capacidad Tratada (l/s) | Volumen tratado (m³/año) |
|-----------------|--------------------------------------|------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Oriente         | (Aerobia Proceso Bio-lógico)         | Lagunas Aireadas | Enero 1996          | 2 000                     | 1 650                   | 42 461 347               |
| Sur             | Biológico                            | Lodos Activados  | Enero 2010          | 400                       | 350                     | 11 599 279               |
| Cristobal Colón | Biológico                            | Lodos Activados  | Marzo 2013          | 100                       | 50                      | 1 494 970                |
| Del Parque      | Biológica (Aireación Semi Extendida) | Lodos Activados  | Junio 2014          | 30                        | 20                      | 163 330                  |
| Dalila          | Aerobio Anóxico                      | Lodos Activados  | Agosto 2015         | 20                        | 0.5                     | 31 000                   |

*Fuente:* Aguas del municipio de Durango

h) Reuso del agua tratada

El agua tratada es principalmente de origen doméstico y se reutiliza en actividades agrícolas, industriales y para el riego de áreas verdes, de acuerdo con la Tabla 2.

**Tabla 2**  
*Reuso del agua tratada en el Municipio de Durango, Dgo.*

| Nombre PTAR     | Reuso del agua tratada                                                                                                                                       |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oriente         | Para uso agrícola del Distrito de Riego 052 módulo III, riego de camellones,, industrial (Unión Fenosa) y descarga a cuerpo receptor (tipo B Acequia Grande) |
| Sur             | Para uso agrícola del Distrito de Riego 052 módulo III, riego de camellones, venta al Club Campestre y Fracc Real Privanzas y Privanzas.                     |
| Cristobal Colón | Para uso agrícola y cuerpo receptor (tipo B río Tunal)                                                                                                       |
| Del Parque      | Riego de áreas verdes en parque, llenado de lago y apoyo de pipas de la Secretaría de Recursos Naturales y Medio Ambiente.                                   |
| Dalila          | Riego de áreas verdes en pipas carretera México.                                                                                                             |

*Fuente:* Aguas del Municipio de Durango

En cuanto a la calidad del efluente, las plantas operan bajo normativas nacionales que establecen límites permisibles para diversos contaminantes, asegurando que el agua tratada cumpla con los estándares requeridos para su reutilización y para la protección de los cuerpos receptores (AMD, 2024). Para ampliar la capacidad de tratamiento y atender el crecimiento urbano, AMD ha desarrollado proyectos como la ampliación de la Planta Sur, incrementando su capacidad de 400 a 1 000 l/s, y la construcción de una nueva planta en el Ejido 20 de noviembre, con capacidad para tratar 500 l/s adicionales.

*i) Tecnología propuesta para la Planta de Tratamiento de Agua Residuales Ejido 20 noviembre*

El sistema de tratamiento de aguas residuales Bio Reactores Multi-Media (MMBR) es una tecnología avanzada que combina múltiples tipos de medios biológicos (biopelícula granular, suspendida y fija) en un solo reactor. Su diseño optimiza la capacidad de tratamiento al permitir una alta densidad de biomasa, lo que mejora la digestión de la carga orgánica y facilita la recuperación de energía en forma de biogás y nutrientes (Azi Applied Technology y AmphiBIO Technologies, 2023).

Los MMBR destacan por su eficiencia energética y versatilidad, ya que pueden operar con influentes de baja y alta carga orgánica, desde aguas residuales municipales hasta industriales con más de 100,000 mg/l de DQO. Su capacidad modular permite ampliar el tratamiento mediante configuraciones en serie o en flujo paralelo.

El proceso de tratamiento MMBR integra etapas físicas y biológicas que generan un efluente de alta calidad. Utiliza tecnologías patentadas que maximizan la eficiencia del sistema, incluyendo biomasa granular (alta densidad y capacidad de sedimentación), difusa o suspendida (excelente digestión, pero susceptible a lavado hidráulico) y fija (biopelícula adherida a bioprotectores de HDPE que garantizan estabilidad y alto rendimiento en eliminación de materia orgánica). Este enfoque modular y adaptable hace de los MMBR una solución innovadora para el tratamiento sostenible de aguas residuales (Azi Applied Technology y AmphiBIO Technologies, 2023).

*j) Comparación con Otros Sistemas Operadores en México:*

- 1) Cobertura Nacional: A nivel nacional, México cuenta con 2 337 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las cuales aproximadamente el 30 % operan bajo el proceso de lodos activados. Sin embargo, solo se trata alrededor del 53 % del agua residual generada en el país (Galindo Pardo et al., 2020).
- 2) Posición de Durango: La ciudad de Durango sobresale al tratar el 100 % de sus aguas residuales, superando significativamente el promedio

nacional y posicionándose como una de las pocas ciudades en México con esta cobertura completa. Estos esfuerzos reflejan el compromiso de Durango con la gestión sostenible del agua y la protección del medio ambiente. El sistema operador AMD en Durango demuestra una gestión eficiente en el tratamiento de aguas residuales, con una cobertura total y esfuerzos continuos en el mantenimiento y mejora de sus instalaciones, situándose por encima del promedio nacional en este ámbito.

## **1.5. Objetivo de la investigación**

El objetivo de esta investigación fue evaluar la viabilidad económica y ambiental de implementar una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en la ciudad de Durango, considerando criterios de sostenibilidad hídrica, economía circular y adaptación al cambio climático. Para lograrlo, se combinó el análisis de información documental, entrevistas semiestructuradas a actores clave y la aplicación de herramientas de evaluación financiera y ambiental.

## **2. Metodología**

### **2.1 Diseño de investigación**

El estudio adoptó un enfoque mixto (cualitativo-cuantitativo), de carácter descriptivo y de corte transversal, desarrollado entre enero y marzo de 2024.

- a) Enfoque cualitativo: para identificar percepciones, experiencias y retos en la gestión de aguas residuales a partir de entrevistas a personal especializado.
- b) Enfoque cuantitativo: para medir indicadores financieros y ambientales mediante datos numéricos oficiales y cálculos propios.
- c) Carácter descriptivo: porque se describe la situación actual del tratamiento de aguas residuales y se evalúan posibles escenarios de mejora.
- d) Corte transversal: la recolección de datos se realizó en un único periodo temporal, sin seguimiento longitudinal.

## 2.2. Procedimiento general

El trabajo de investigación se desarrolló en tres fases:

### 2.2.1. Revisión documental y diagnóstico inicial:

- a) Se recopilaron informes técnicos de *Aguas del Municipio de Durango* (AMD, 2024) y la oferta técnica de *Azi Applied Technology* y *Amphibio Technologies* (2023).
- b) Se consultaron artículos científicos indexados en Scopus y Web of Science, priorizando publicaciones de 2019 a 2024 sobre economía circular del agua, tratamiento de aguas residuales y evaluación económica de infraestructura hídrica.
- c) Se revisaron normativas nacionales (NOM-001-SEMARNAT-2021) y estándares internacionales sobre calidad de efluentes y eficiencia energética en plantas de tratamiento.

### 2.2.2. Trabajo de campo cualitativo:

- a) Se realizaron entrevistas semiestructuradas a personal del área de saneamiento de AMD para obtener información no disponible en documentos públicos.
- b) La guía de entrevista incluyó seis bloques temáticos: capacidad instalada, tecnologías empleadas, costos operativos, mantenimiento, estrategias de reutilización, retos y oportunidades de mejora.

### 2.2.3. Análisis cuantitativo y financiero:

- a) Con los datos obtenidos, se desarrolló un Análisis Costo-Beneficio (ACB) incorporando variables ambientales.
- b) Se calcularon el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Índice de Rentabilidad (IR) y el Período de Recuperación, con base en flujos proyectados a 20 años.
- c) Se estimaron beneficios ambientales como reducción de carga orgánica, volumen de agua reutilizado y potencial de generación de biogás.

## 2.3 Técnicas y herramientas empleadas

### 2.3.1. Parte cualitativa

- a) Técnica utilizada: entrevista semiestructurada.
- b) Instrumento: guía de entrevista elaborada ad hoc, validada por dos especialistas en gestión hídrica.

### 2.3.2. Criterios de selección de participantes:

- a) Experiencia mínima de 5 años en operación o gestión de plantas de tratamiento.
- b) Participación directa en la operación o planeación de PTAR en el municipio.

### 2.3.3. Tipo de muestreo: no probabilístico, por discrecional (selección deliberada de personas con conocimiento especializado).

- a) Número de entrevistados: 6 (3 jefes de planta, 2 ingenieros de operación, 1 directivo del área de saneamiento).

### 2.3.4. Procedimiento de aplicación:

- a) Entrevistas presenciales en instalaciones de AMD.
- b) Duración promedio: 35 minutos.
- c) Registro en audio con consentimiento informado y transcripción literal.

### 2.3.5. Método de análisis:

Codificación temática inductiva, agrupando respuestas en categorías según su recurrencia y relevancia.

## 2.4. Parte cuantitativa

### 2.4.1. Datos utilizados:

- a) Costos de inversión, operación y mantenimiento de la nueva planta (proyección oficial AMD y oferta técnica de proveedores).
- b) Ingresos por venta de agua tratada, biogás y subproductos.
- c) Parámetros ambientales de calidad de efluente y reducción de contaminantes.

### 2.4.2. Instrumentos y técnicas de cálculo:

- a) **Análisis Costo-Beneficio (ACB):** permite determinar la viabilidad económica y social del proyecto al comparar los costos asociados con la implementación y operación con los beneficios económicos, sociales y ambientales que se derivan de su ejecución.
- b) **Análisis Costo-Beneficio Ambiental (ACB-A):** ajusta el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) al considerar externalidades ambientales y costos evitados.
- c) **Valor Presente Neto (VPN):** Calcula la diferencia entre los flujos de beneficios y costos proyectados, descontados a una tasa específica, para determinar la rentabilidad del proyecto en términos presentes (utilizando tasa de descuento del 9.5 %, horizonte de 20 años). Un VPN positivo indica que los beneficios superan a los costos, sugiriendo que el proyecto es económicamente viable (Azqueta Oyarzun, 1994). La fórmula para calcular el VPN es:

$$VPN = \sum \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Donde:

B<sub>t</sub> = Beneficios en el período t

C<sub>t</sub> = Costos en el período t

r = Tasa de descuento

C<sub>0</sub> = Inversión inicial

t = Año del análisis

Tasa Interna de Retorno (TIR): calculada a partir de la ecuación  $VPN = 0$ . Si la TIR es mayor que la tasa mínima aceptable de retorno, el proyecto se considera rentable (Azqueta Oyarzun, 1994).

Índice de Rentabilidad (IR): relación entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos. Un IR mayor a 1 indica que los beneficios superan a los costos, sugiriendo que el proyecto es rentable (Azqueta Oyarzun, 1994).

$$IR = \frac{VPN + C_0}{C_0}$$

Período de recuperación: ayuda a evaluar el riesgo y la liquidez del proyecto.

Hoja de cálculo en Microsoft Excel para todos los cálculos financieros.

## **2.5. Criterios de selección de fuentes documentales**

Se seleccionaron documentos y publicaciones que cumplieran los siguientes requisitos:

- a) Pertinencia temática: relacionados con tratamiento de aguas residuales, economía circular, evaluación económica o impactos ambientales.
- b) Periodo de publicación: preferentemente de 2019 a 2024, salvo textos clásicos de referencia en economía ambiental.
- c) Rigor académico: publicaciones arbitradas, informes oficiales o reportes técnicos de organismos gubernamentales o empresas especializadas.

## **2.6 Alcances y limitaciones**

### *2.6.1 Alcances:*

- a) El estudio ofrece una evaluación integral (económica y ambiental) de un proyecto de infraestructura hídrica en un contexto real.
- b) Proporciona datos financieros claros que pueden servir para la toma de decisiones de política pública y planeación urbana.

### 2.6.2 Limitaciones:

- a) La proyección de costos e ingresos asume condiciones económicas estables y no contempla fluctuaciones abruptas en precios de energía o agua.
- b) El análisis cualitativo se basa en un número reducido de entrevistados, lo que puede limitar la representatividad de opiniones.
- c) Los beneficios ambientales se estiman con base en proyecciones y no en mediciones directas de la nueva planta, ya que aún no está en operación.

## 3. Resultados

El análisis financiero y ambiental de la nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Durango proporciona una evaluación integral de su viabilidad económica, considerando tanto los costos de inversión como los beneficios proyectados. En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir del cálculo de costos iniciales de adquisición de terrenos, construcción y equipamiento, así como los costos operativos y de mantenimiento requeridos para el funcionamiento eficiente de la planta.

Los resultados que se presentan a continuación derivan de la aplicación combinada del análisis documental, las entrevistas semiestructuradas y las herramientas financieras descritas en la metodología. Se organizan en tres apartados: Caracterización del sistema actual, análisis financiero del proyecto de nueva planta de tratamiento y beneficios ambientales y sociales esperados.

### 3.1. Caracterización del sistema actual

A partir de la revisión documental y las entrevistas al personal técnico y directivo de *Aguas del Municipio de Durango* (AMD), se obtuvo un panorama actualizado de la infraestructura existente para el tratamiento de aguas residuales:

- a) El municipio opera cinco plantas con una capacidad instalada conjunta de 2 550 litros por segundo (l/s), tratando el 100 % de las aguas

residuales generadas, cifra que supera el promedio nacional del 53 % (CONAGUA, 2023).

- b) Las tecnologías empleadas incluyen lagunas aireadas y lodos activados, con variaciones en la eficiencia según la planta.
- c) El agua tratada se reutiliza principalmente para riego agrícola (Distrito de Riego 052), áreas verdes y procesos industriales.

De acuerdo con el personal entrevistado, los principales retos son:

- a) Falta de capacidad para absorber incrementos en la generación de aguas residuales debido al crecimiento urbano e industrial.
- b) Limitaciones tecnológicas para cumplir con normas más estrictas de calidad de efluentes.
- c) Oportunidades desaprovechadas en la valorización de subproductos como lodos y biogás.

### 3.2. Análisis financiero de la nueva planta (tecnología MMBR)

El proyecto evaluado considera la instalación de una PTAR con tecnología Bio Reactores Multi-Media (MMBR), con capacidad para 500 l/s, en el Ejido 20 de Noviembre. El resumen financiero, con los montos de inversión inicial, ingresos y egresos, se presenta en la tabla 3 y en las figuras 2, 3 y 4.

**Tabla 3**  
*Resumen financiero del proyecto*

|                         | <b>Concepto</b>         | <b>Monto \$(MXN)</b> |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Inversión Inicial<br>Co | Adquisición de terrenos | 1 000 000.00         |
|                         | Obra civil              | 6 004 805.00         |
|                         | Equipamiento            | 177 886 797.40       |
|                         | Total Inversión Inicial | 184 891 602.00       |
| Ingresos<br>Bt          | Cuotas de vertido       | 37 324 800.00        |
|                         | Agua para irrigación    | 24 862 173.72        |
|                         | Biogás (calor)          | 4 446 368.76         |
|                         | Sustrato orgánico       | 558 368.76           |
|                         | Total ingresos          | 67 191 711.24        |

|               |                        |               |
|---------------|------------------------|---------------|
| Egresos<br>Ct | Energía eléctrica      | 1 813 602.48  |
|               | Personal               | 882 000.00    |
|               | Lodos digeridos        | 18 662.04     |
|               | Mantenimiento          | 132 596.40    |
|               | Pruebas de laboratorio | 35 712.00     |
|               | Total egresos          | 2 882 572.92  |
|               | Balance neto anual     | 64 309 138.32 |

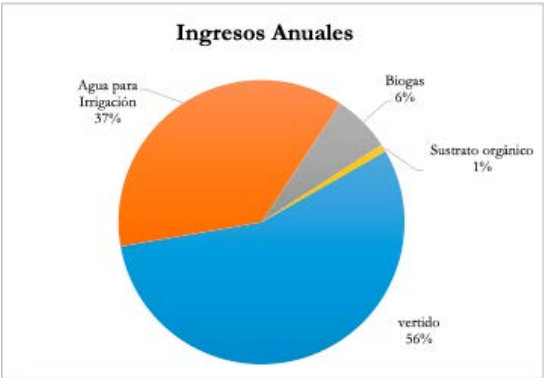
Fuente: Agual Municipio de Durango

**Figura 2**  
*Panorama económico del proyecto de Planta de Tratamiento*



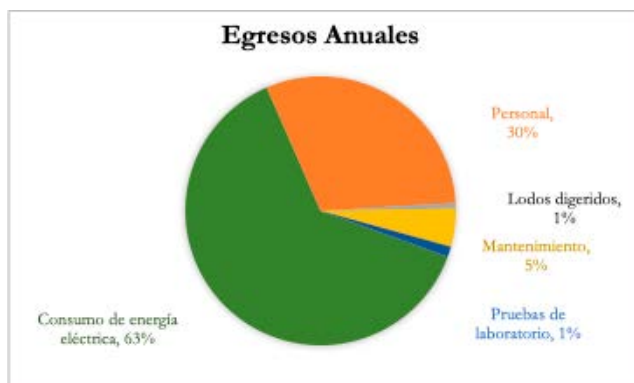
Fuente: Agual Municipio de Durango

**Figura 3**  
*Distribución porcentual de ingresos anuales de la nueva PTAR*



Fuente: Agual Municipio de Durango

**Figura 4**  
Distribución porcentual de egresos anuales de la nueva PTAR



Fuente: Agual Municipio de Durango

### 3.3 Indicadores financieros:

#### a) Valor Presente Neto (VPN)

$$VPN = \sum \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} - C_0$$

Para este estudio, se consideró una tasa de descuento del 9.5 % anual ( $r = 0.095$ ), un horizonte de análisis de diez años y los flujos de caja anuales estimados a partir de los ingresos y egresos proyectados. Los cálculos se desarrollaron en una hoja de cálculo de Excel incorporando los beneficios netos de cada año ( $B_t - C_t$ ), actualizados mediante el factor de descuento  $(1+r)^t$ . El resultado obtenido para el proyecto fue un VPN de \$256 195 681.16 MXN, lo que indica una rentabilidad positiva y una viabilidad económica favorable (Tabla 4).

**Tabla 4**  
*Cálculo de Valor Presente Neto*

| <b>Año</b>                       | <b>0</b>         | <b>1</b>      | <b>2</b>      | <b>4</b>      | <b>5</b>      |
|----------------------------------|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Co</b>                        | \$184 891 602.40 |               |               |               |               |
| <b>Bt</b>                        | 0.00             | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 |
| <b>Ct</b>                        | \$0.00           | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  |
| <b>Bt-Ct</b>                     | 0                | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 |
| <b>r</b>                         | 0.095            | 0.095         | 0.095         | 0.095         | 0.095         |
| <b>(1+r)<sup>t</sup></b>         | 1                | 1.095         | 1.199025      | 1.312932375   | 1.574238741   |
| <b>(Bt-Ct)/(1+r)<sup>t</sup></b> | 0                | 58 729 806.68 | 53 634 526.65 | 48 981 302.88 | 40 850 943.79 |

| <b>Año</b>                       | <b>6</b>      | <b>7</b>      | <b>8</b>      | <b>9</b>      | <b>10</b>      |
|----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Bt</b>                        | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 | 67 191 711.24 | 159 637 512.44 |
| <b>Ct</b>                        | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  | 2 882 572.92  | 2 882 572.92   |
| <b>Bt-Ct</b>                     | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 | 64 309 138.32 | 156 754 939.52 |
| <b>r</b>                         | 0.095         | 0.095         | 0.095         | 0.095         | 0.095          |
| <b>(1+r)<sup>t</sup></b>         | 1.723791421   | 1.887551606   | 2.066869009   | 2.263221565   | 2.478227613    |
| <b>(Bt-Ct)/(1+r)<sup>t</sup></b> | 37 306 797.98 | 34 070 135.14 | 31 114 278.67 | 28 414 866.37 | 63 252 841.94  |

Fuente: Elaboración propia

Tasa Interna de Retorno (TIR): Tras aplicar el método de iteración, variando la tasa de descuento hasta que el Valor Presente Neto (VPN) se aproximara a cero, se determinó que la TIR del proyecto es de 33.81 %. Este valor supera ampliamente la tasa de descuento considerada en el análisis (9.5 %), lo que indica que el proyecto presenta una rentabilidad significativamente superior al umbral mínimo esperado, confirmando su viabilidad económica.

### 3.4. Índice de Rentabilidad (IR):

Se calculó con la ecuación

$$IR = \frac{VPN + C_0}{C_0}$$

$$IR = (256,195,681.16 + 184,891,602.40) / (184,891,602.40) = 2.39$$

Es decir, por cada peso invertido, se obtienen 2.39 pesos de beneficio presente.

### 3.5. Período de recuperación:

El Período de recuperación es el tiempo que se requiere para que los flujos de beneficios acumulados igualen la inversión inicial (Tabla 5). En este proyecto fue de 2.9 años, lo que se considera rápido para proyectos de infraestructura hídrica.

**Tabla 5**  
*Periodo de recuperación*

| Inversión inicial (Co) \$ MNX | Año | Beneficios acumulados (Bt-Ct) \$ MNX |
|-------------------------------|-----|--------------------------------------|
| 184 891 602.40                | 1   | 64 309 138.32                        |
|                               | 2   | 128 618 276.64                       |
|                               | 3   | 192 927 414.96                       |

*Fuente:* Elaboración propia

### 3.6. Beneficios ambientales y sociales esperados

El análisis cualitativo permitió identificar que la nueva PTAR no solo responde a necesidades operativas, sino que aporta beneficios directos en términos de sostenibilidad:

#### 3.6.1. Ambientales:

- Reducción de contaminantes orgánicos y sólidos suspendidos en cuerpos receptores.
- Disminución de emisiones de GEI por aprovechamiento energético del biogás.
- Incremento en disponibilidad de agua segura para riego, reduciendo extracción de fuentes naturales.

### 3.6.2. Sociales:

- a) Mayor seguridad hídrica para actividades agrícolas e industriales.
- b) Mejora en la calidad de vida de comunidades locales por disminución de riesgos sanitarios.
- c) Generación de empleos directos en operación y mantenimiento de la planta.

El análisis financiero realizado a partir de los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como de los ingresos proyectados por la venta de servicios y subproductos de la nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Durango, arrojó un Valor Presente Neto (VPN) de \$256 195 681.16 MXN, una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 33.81 % y un Índice de Rentabilidad (IR) de 2.39. Estos indicadores evidencian que, por cada peso invertido, se obtienen \$2.39 en valor presente, con una rentabilidad muy superior a la tasa de descuento utilizada (9.5 %), tal como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5**  
*Indicadores financieros del proyecto de la nueva PTAR*



*Fuente:* Elaboración propia

En términos de beneficios, los ingresos anuales estimados ascienden a \$67 191 711.24 MXN, provenientes de cuotas de vertido (55.5 %), venta de agua para irrigación (37 %), aprovechamiento de biogás (6.6 %) y

comercialización de sustrato orgánico (0.8 %). Por su parte, los egresos anuales suman \$2 882 372.92 MXN, concentrados principalmente en consumo energético (63 %) y costos de personal (31 %).

En el ámbito ambiental, la planta permitirá tratar el 100 % de las aguas residuales generadas en el municipio, reducir la descarga de contaminantes y generar subproductos valorizables, contribuyendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 6, 11 y 13). Socialmente, el proyecto impactará en la mejora de la salud pública, la seguridad hídrica y la generación de empleo local.

#### **4. Discusión**

El análisis realizado evidencia que la instalación de una nueva Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en Durango, con tecnología Bio Reactores Multi-Media (MMBR), no solo es económicamente viable, sino que aporta beneficios ambientales y sociales significativos. Estos hallazgos refuerzan la idea de que las inversiones en infraestructura hídrica bajo criterios de economía circular representan una estrategia efectiva de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

Desde la perspectiva económica, el proyecto muestra un VPN de \$256 195 681.16 MXN y una TIR del 33.81 %, cifras que superan ampliamente los umbrales de rentabilidad establecidos en literatura especializada para proyectos de infraestructura hídrica (Proyectos México, 2021; OECD, 2023). Comparado con experiencias como la PTAR de Atotonilco, cuyo periodo de recuperación estimado es de 10 a 15 años (Torregrosa et al., 2016), la planta proyectada en Durango presenta un retorno de inversión en menos de tres años, lo que la posiciona como un modelo de eficiencia económica a nivel nacional.

En el plano ambiental, los resultados confirman que la nueva planta permitirá:

- a) Reducir la carga contaminante en cuerpos receptores.
- b) Incrementar la reutilización de agua tratada para usos agrícolas e industriales.
- c) Disminuir emisiones de gases de efecto invernadero mediante el aprovechamiento del biogás generado en el proceso.

Estos beneficios se alinean con la evidencia presentada por Faragò (2022) y Sánchez et al. (2024), quienes destacan que las PTAR modernas, integradas a modelos de economía circular, logran un impacto ambiental positivo que trasciende su función básica de saneamiento. En cuanto a la dimensión social, las entrevistas al personal técnico y directivo de AMD subrayan que la nueva infraestructura aumentará la seguridad hídrica de la región y reducirá riesgos sanitarios asociados al uso de aguas no tratadas. Además, se espera la creación de empleos directos e indirectos, lo que generará un efecto multiplicador en la economía local, como también lo documentan estudios de la UNESCO (WWAP, 2018) sobre infraestructura hídrica sostenible.

Un aspecto relevante del presente estudio es el enfoque integral que combina análisis financiero, evaluación ambiental y percepción de actores clave. A diferencia de trabajos previos que se concentran exclusivamente en la viabilidad técnica o económica, esta investigación incorpora también el componente cualitativo, lo que permite una comprensión más amplia del contexto y de las barreras operativas.

No obstante, se identifican limitaciones: las proyecciones financieras dependen de la estabilidad en precios de energía y agua, y los beneficios ambientales se estiman a partir de proyecciones y no de mediciones directas, ya que la planta aún no está en operación. Futuras investigaciones deberían incluir un monitoreo longitudinal posterior a la puesta en marcha, para validar las estimaciones y ajustar los indicadores de rentabilidad ambiental y social. En síntesis, los resultados obtenidos confirman que la implementación de la PTAR con tecnología MMBR en Durango no solo es rentable, sino que constituye un ejemplo replicable de infraestructura resiliente y sostenible, integrando beneficios económicos, ambientales y sociales en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6, 11 y 13.

## 5. Conclusiones

El objetivo de evaluar la viabilidad económica y ambiental de la nueva PTAR en Durango fue plenamente alcanzado y el análisis evidenció que el proyecto genera un VPN positivo de \$256 195 681.16 MXN, con una TIR de 33.81 % y un IR de 2.39, valores que superan ampliamente los

criterios mínimos de aceptación de inversión. Estos resultados confirman que la planta es económicamente viable, presenta una alta rentabilidad y un período de recuperación reducido.

Desde el ámbito ambiental y social, se verificó que el proyecto permitirá el tratamiento total de las aguas residuales municipales, reducirá la descarga de contaminantes y generará subproductos valorizables, contribuyendo a la mejora de la salud pública y la seguridad hídrica. Además, la incorporación de un enfoque de economía circular y el aprovechamiento integral de recursos convierten este modelo en una alternativa replicable en otras ciudades con condiciones climáticas y socioeconómicas similares. Como aporte, este trabajo presenta un marco metodológico que integra el análisis financiero con la evaluación de impactos ambientales y sociales bajo un enfoque de sostenibilidad integral, ofreciendo una referencia útil para la toma de decisiones en proyectos de gestión del agua en zonas semiáridas.

## 6. Referencias

- Aguas del Municipio de Durango (AMD). (2024). *Informe técnico: Saneamiento del agua residual en el Municipio de Durango* [Archivo]. Ciudad de Durango, Durango.
- Ávila, M., & Argueta, J. (2024). *El cambio climático y los sistemas de tratamiento de aguas residuales*.
- Awinia, C., Mganga, K. Z., & Kimwaga, R. J. (2025). Effectiveness of innovative circular technologies for water schemes: Lessons from rural contexts. *Frontiers in Sustainability*, 6, 1388175. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1388175>
- Azi Applied Technology & AmphiBIO Technologies. (2023). *Oferta técnica: Plantas orgánicas de recuperación de recursos de aguas residuales. Autosustentables, carbono positivas* [Informe técnico]. Azimuth.
- Azqueta, D. (2007). *Introducción a la economía ambiental*. McGraw-Hill.
- Azqueta, D., & Sotelsek, D. (2012). *Evaluación económica del medio ambiente: teoría y práctica*. McGraw-Hill.

- Beckett, R. C., & Terziovski, M. (2025). Integrating Circular Economy Principles in Water Resilience: Implications for Corporate Governance and Sustainability Reporting. *Journal of Risk and Financial Management*, 18(5), 261. <https://doi.org/10.3390/jrfm18050261>
- Benstaali, I., Talia, A., & Benadela, L. (2024). Optimized wastewater management utilizing multivariate statistical analysis: a case study of the Mascara wastewater treatment plant, Algeria. *Water Science & Technology*, 90(4), 1290–1305. <https://doi.org/https://doi.org/10.2166/wst.2024.276>
- Bosco, C., Seglem, K. N., Sivertsen, E., Jovanović, O., & Helness, H. (2025). Developing a framework to assess water smartness and sustainability of circular economy solutions in the water sector. *Journal of Cleaner Production*, 517, 145874. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145874>
- Cassin, J., & Locatelli, B. (2020). *Guía para la evaluación de infraestructura natural para seguridad hídrica*.
- Dasgupta, P. (2021). *La economía de la biodiversidad: la revisión de Dasgupta*. Ministerio de Hacienda, Gobierno del Reino Unido . <https://www.gov.uk/government/publications/the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>
- Delacore, P., & Martínez, J. (2021). Environmental accounting in water infrastructure projects. *Journal of Environmental Economics*, 45(3), 112-130.
- Faragò, M. (2022). *Sustainability assessment of water resource recovery facilities* [PhD Thesis].
- Farfán Chilicaus, G. C., Cruz Salinas, L. E., Silva León, P. M., Lizarzaburu Aguinaga, D. A., Vera Zelada, P., Vera Zelada, L. A., Luque Luque, E. O., Licapa Redolfo, R., & Ramos Farroñán, E. V. (2025). Circular Economy and Water Sustainability: Systematic Review of Water Management Technologies and Strategies (2018–2024). *Sustainability*, 17(14), 6544. <https://doi.org/10.3390/su17146544>
- Ngene, B. U., Nwafor, C. O., Bamigboye, G. O., Ogbigye, A. S., Ogunbare, J. O., & Akpan, V. E. (2021). Assessment of water resources development and exploitation in Nigeria: A review of integrated water resources management approach. *Heliyon*, 7(e05955). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05955>

- García-Sánchez, M., & Güereca, L. P. (2019). Environmental and social life cycle assessment of urban water systems: The case of Mexico City. *Science of the Total Environment*, 693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.270>
- Garrido-Baserba, M., et al. (2020). *Environmental and economic assessment of water recovery facilities*.
- Hashem, M. S., & Qi, X. Bin. (2021). Treated wastewater irrigation-a review. *Water (Switzerland)*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/w13111527>
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas de la investigación cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V.
- Hussain, M. I., Muscolo, A., Farooq, M., & Ahmad, W. (2019). Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. In *Agricultural Water Management* (Vol. 221). <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>
- IPCC. (2023). *Sixth Assessment Report*. <https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/>
- Karimi, M., Tabiee, M., Karami, S., Karimi, V., & Karamidehkordi, E. (2024). Climate change and water scarcity impacts on sustainability in semi-arid areas: Lessons from the South of Iran. *Groundwater for Sustainable Development*, 24,101075. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101075>
- Lange, GM, Wodon, Q. y Carey, K. (2018). *La cambiante riqueza de las naciones en 2018: construyendo un futuro sostenible*. Publicaciones del Banco Mundial .
- Navarro-Sousa, S.; Estruch-Guitart, V.; García, C. (2020). Uso de indicadores causa-efecto para el diagnóstico de la sostenibilidad hídrica en las Islas Baleares (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 85, 1-48. <https://doi.org/10.21138/bage.2833>
- Obst, C., Hein, L. y Edens, B. (2015). Contabilidad nacional y valoración de los activos ecosistémicos y sus servicios. *Environmental and Resource Economics*, 64(1), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10640-015-9921-1>
- OECD. (2023). *Sustainable infrastructure investment: Environmental considerations*. OECD Publishing.

- Organisation for Economic Co-operation and Development. (2025). *The Circular Water Economy in Latin America*. OECD Urban Studies. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/a0508572-en>
- OECD (2018), *Cost-Benefit Analysis and the Environment: Further Developments and Policy Use*. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>.
- Proyectos México. (2021). *Evaluación socioeconómica: Construcción de la presa Tunal II para el abastecimiento de agua potable para la ciudad de Durango, Dgo.* <https://www.proyectosmexico.gob.mx/wp-content/uploads/2021/09/Anexo-4-Factibilidad-Econ%C3%B3mica.pdf>
- Sánchez, M., Gutiérrez, C., Viancos-González, P., y González, P. (2024). Economía circular del agua en Latinoamérica: Un análisis de eficiencia y productividad. *Revista De Ciencias Sociales*, XXX(Número Especial 10), 745-759.
- Torregrosa, ML, Hernández, E., & Cárdenas, A. (2016). Evaluación de la eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Atotonilco. *Ingeniería y Ciencia Ambiental*, 13(2), 45-61.
- UNESCO. (2023). *UN World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659>
- United Nations Environment Programme. (2022). *Greening the Blue Report 2022: The UN system's environmental footprint and efforts to reduce it*. United Nations. [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41373/Greening\\_the\\_blue\\_2022.pdf](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/41373/Greening_the_blue_2022.pdf)
- United Nations Statistics Division. (2024). *SDG Report 2024 – Goal 6: Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-06/>
- United Nations University – Institute for Water, Environment and Health. (2024). *Global Wastewater Status*. UNU-INWEH. <https://unu.edu/inweh/tools-and-resources/global-wastewater-status>
- World Health Organization. (2025). Proportion of safely treated domestic wastewater flows (%) [Indicator]. En *World health statistics 2024: Monitoring health for the SDGs*. <https://data.who.int/indicators/i/6E-FF579/A37BDD6>

- WWAP/UNESCO. (2018). *Nature-Based Solutions for Water*.
- Zhang, S., Xiang, M., Xu, Z., Wang, L., & Zhang, C. (2020). Evaluation of water cycle health status based on a cloud model. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118850>
- Zuccarello, P., Manganelli, M., Oliveri Conti, G., Copat, C., Grasso, A., Cristaldi, A., De Angelis, G., Testai, E., Stefanelli, M., Vichi, S., Fiore, M., & Ferrante, M. (2021). Water quality and human health: A simple monitoring model of toxic cyanobacteria growth in highly variable Mediterranean hot dry environments. *Environmental Research*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110291>