

Informe Técnico del Proyecto A521

Obsolescencia de la Infraestructura Hidráulica en México: Retos y perspectivas

Dr. Ismael Aguilar Barajas
(Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno)
Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco
(Escuela de Ingeniería y Ciencias)

Dr. Víctor M. Espinoza Juárez
Lic. Sandra Medellín Castillo
Ing. Eduardo A. Rodríguez Maldonado
M.I. Francisco Rico Moreno

Monterrey, N.L., 31 de enero de 2026

Contenido

<i>Lista de figuras</i>	<i>ii</i>
<i>Lista de tablas</i>	<i>v</i>
<i>Lista de acrónimos</i>	<i>vii</i>
<i>Reconocimientos</i>	<i>ix</i>
Resumen Ejecutivo	1
1 Introducción	19
2 Revisión de la literatura	33
3 Marco Metodológico	73
4 Infraestructura Hidráulica en México: Escala nacional	93
5 Infraestructura Hidráulica en México: Escala metropolitana (Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara)	135
6 Financiamiento e inversión en infraestructura hidráulica en México	167
7 Fenómenos hidrometeorológicos extremos e infraestructura Resiliente al clima: impactos y financiamiento en México	187
8 Conclusiones, recomendaciones y aportaciones del proyecto	203
Bibliografía	221

Figuras

2.1	Gestión de fugas como un sistema combinado de oferta y demanda	46
4.1.	Estaciones climatológicas en operación en México, 2025 (septiembre)	95
4.2.	Distribución de la antigüedad de estaciones climatológicas en México, 2025 (mayo)	97
4.3.	Número de estaciones instaladas por año en México, 1877 – 2025 (mayo)	98
4.4.	Estaciones climatológicas activas por año (al menos 6 meses de operación) en México, 1877 – 2025 (mayo)	99
4.5	Evolución de estaciones climatológicas activas en Chihuahua, 1903 – 2025 (mayo)	100
4.6.	Evolución de estaciones climatológicas activas en la RHA Río Bravo, 1892 – 2025 (mayo)	100
4.7.	Estación climatológica 32030 La Florida en Valparaíso, Zacatecas	102
4.8.	Red hidrométrica activa en México, 2025 (junio)	103
4.9.	Distribución de la antigüedad de estaciones hidrométricas en México, 2025 (junio)	104
4.10.	Estaciones incorporadas por año a la red hidrométrica en México, 1900 – 2025 (julio)	106
4.11.	Estaciones hidrométricas activas por año (al menos 6 meses de registros al año) en México, dar periodo 1900 – 2025 (julio)	106
4.12.	Esquema de una estación hidrométrica convencional	108

4.13. Personal realizando un aforo desde la canastilla	108
4.14 Inicio del tablero de visualización para el caso de la red climatológica en México.	110
4.15 Inicio del tablero de visualización para el caso de la red hidrométrica en México	111
4.15. Número de presas construidas en México por década (de las 210 principales), adelante (Datos a abril de 2025).	116
4.16. Histograma de edades de las 210 principales presas en México (en años, con datos a abril de 2025).	117
4.17. Reparaciones y/o modificaciones de las principales 2010 presas de México en los últimos 50 años (Datos a abril de 2025).	117
4.18. Histograma de las edades de los 80 principales acueductos de México, 2025 (mayo).	120
4.19. Evolución de las Plantas Potabilizadoras en México a 2024	125
4.20. Edades de las plantas potabilizadoras en México a 2024	125
4.21. Evolución de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México a 2024.	128
4.22. Edades de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México a 2024.	129
4.23. Factor de envejecimiento medio general de la Infraestructura en México	132
4.24. Mapeo general de la infraestructura en México	133
5.1, Zona metropolitana del Valle de México (Metrópolis de México, 2020)	136
5.2. Alcaldías de la Ciudad de México	137
5.3. Edad de la red de distribución de agua potable en CDMX, 2025 (diciembre)	142
5.4. Sistema hidráulico de drenaje de CDMX, 2025 (diciembre)	144
5.5. Área Metropolitana de Monterrey (Metrópolis de México, 2020)	147
5.6. Red de distribución de agua potable en el AMM, 2025 (diciembre)	151
5.7. Mapa del Área Metropolitana de Guadalajara	155

5.8. Distribución espacial de edades de la red de distribución de agua potable en el AMG, 2025 (diciembre)	159
5.9. Distribución de la red de alcantarillado edades en el AMG, 2025 (diciembre)	161
5.10. Comparación de los Factores de envejecimiento de las tres metrópolis	163
5.11. Envejecimiento medio en las metrópolis por tipo de obra	164
6.1 Presupuesto de la CONAGUA, 2010-2024 (MX\$ miles de millones, precios constantes de 2024)	170
6.2 Inversiones del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México por origen y destino de los recursos, 1999-2023 (porcentajes promedio)	177
7.1. Recursos asignados por el FOPREDEN, 2006-2022 (millones de pesos corrientes)	194

Tablas

2.1. Metodología de la ASCE para calificar la infraestructura en Estados Unidos, 2025	51
2.2 ASCE's Infrastructure Report Card, 2025. Resultados y escalas de calificación.	52
2.3 Definiciones de deterioro y sistemas de gestión de administración en Japón, 2020	53
3.1 Relación de Reuniones Nacionales de Infraestructura Hidráulica en México, 2009-2019	86
3.2 Información sobre infraestructura publicada por Organismos Operadores Seleccionados (relacionado con infraestructura). 2025	88
4.1 Distribución de la antigüedad de estaciones climatológicas en México, 2025 (mayo).	96
4.2 Distribución de la antigüedad de estaciones hidrométricas en México, 2025 (junio)	105
4.3 Principales presas por región en México, 2024 (septiembre)	114
4.4 Vida útil de tuberías en función del material	122
4.5. Factores de envejecimiento de la infraestructura en México	132
5.1. Principales fuentes de abastecimiento a la CDMX	138
5.2. Principales acueductos hacia la Ciudad de México, 2025 (Diciembre)	139
5.3. Las 45 principales plantas potabilizadoras en Ciudad de México, 2025 (diciembre)	141
5.4. Indicadores de envejecimiento de la red en la CDMX, 2025 (diciembre)	142
5.5. Principales sistemas de desalojo de aguas en CDMX y sus edades a 2025 (diciembre)	144
5.6. Principales plantas de tratamiento en la Ciudad de México, 2025 (diciembre)	145
5.7. Presas que abastecen al AMM, 2025 (diciembre)	148
5.8. Acueductos para el abastecimiento de agua al AMM, 2025 (diciembre)	149

5.9. Principales plantas potabilizadoras en el AMM, 2025 (diciembre)	150
5.10. Indicadores de envejecimiento de la red en el AMM, 2025 (diciembre)	152
5.11. Indicadores de la red de alcantarillado sanitario en el AMM, 2025 (diciembre)	153
5.12. Plantas de tratamiento en los municipios metropolitanos operadas por SADM, 2025 (diciembre)	154
5.13. Presas del sistema de abastecimiento al AMG, 2025 (diciembre)	156
5.14. Principales acueductos hacia el AMG, 2025 (diciembre)	157
5.15. Plantas potabilizadoras en Guadalajara, operadas por el SIAPA, 2025 (diciembre)	157
5.16. Edad de las Plantas potabilizadoras en Guadalajara operadas por el SIAPA, 2025 (diciembre)	158
5.17. Indicadores de la red de distribución de agua potable en el AMG, 2025 (diciembre)	160
5.18. Indicadores de edad de la red secundaria de alcantarillado en el AMG, 2025 (diciembre)	161
5.19. Plantas de tratamiento en la ciudad de Guadalajara, 2025 (diciembre)	162
5.20. Valores numéricos de los factores de envejecimiento de las tres metrópolis, 2025 (diciembre)	163
6.1 Inversión por rubro de aplicación en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)	174
6.2 Inversión por origen de los recursos en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)	175
6.3 Inversión por rubro de aplicación de los recursos en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)	176
6.4 Inversiones del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México por fuente de los recursos, 1999-2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)	178
6.5 Evolución del Presupuesto de Programas de Inversión K asignado en el PPEF, 2017-2025 (millones de pesos)	179
7.1 Taxonomía para la estimación de los costos directos e indirectos de las inundaciones	192
7.2 Fondos de desastres 2022 de los estados calificados expuestos a huracanes respecto al mayor daño registrado entre 2010 y 2022.	199

Acrónimos

AMG	Área Metropolitana de Guadalajara
AMM	Área Metropolitana de Monterrey
ANC	Agua no Contabilizada
ANEAS	Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México
ASCE	American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles)
ASF	Auditoría Superior de la Federación
Banxico	Banco de México
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CAF	Banco de Desarrollo de América Latina
CDMX	Ciudad de México
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
CICM	Colegio de Ingenieros Civiles de México
CMIC	Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
ECSG	Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno
EIC	Escuela de Ingeniería y Ciencias
ENCIG	Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental
ENIGH	Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares
FGRA	Fundación Gonzalo Río Arronte
GDL	Guadalajara
IFC	International Finance Corporation (Corporación Financiera Internacional)
IMCO	Instituto Mexicano para la Competitividad
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto de Estadística y Geografía
IWA	International Water Association (Asociación Internacional del Agua)
MTY	Monterrey
NRW	Non-Revenue Water (Agua que no genera ingresos)
OCDE	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OECD	Organisation for Economic Cooperation and Development (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos)
OLAS	Observatorio Latinoamericano de Agua y Saneamiento

OO	Organismos Operadores
OOAPS	Organismos Operadores de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
PEF	Presupuesto de Egresos
PIGOO	Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores
PPEF	Proyecto de Presupuesto de Egresos
PTARs	Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SADM	Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey
SEGIAGUA	Secretaría de Gestión Integral del Agua
SIAPA	Sistema de Agua Potable y Alcantarillado
SINA	Sistema Nacional de Información del Agua
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
Tec-FGRA	Proyecto Tecnológico de Monterrey-Fundación Gonzalo Río Arronte
UANL	Universidad Autónoma de Nuevo León
UAM	Universidad Autónoma Metropolitana
UdG	Universidad de Guadalajara
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
WEF	World Economic Forum (Foro Económico Mundial)
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Reconocimientos

Este proyecto fue posible gracias al apoyo y confianza de muchas instituciones y personas. Primeramente, se reconoce el apoyo de la Fundación Gonzalo Río Arronte para cofinanciar esta investigación. Además de los recursos financieros, la Fundación aportó capital relacional para exponer hallazgos preliminares del proyecto ante una audiencia calificada y propositiva. Se agradece la confianza de la Mtra. Marta Mejía Montes (presidenta del Patronato y Comisión Ejecutiva, del Dr. Javier Moctezuma Barragán (Director General), del Lic. Francisco J. Mayorga Castañeda (presidente del Comité de Agua), del Mtro. Eugenio Barrios Ordóñez (director del Programa de Agua), de la Mtra. Dolores Corral (Coordinadora de Vinculación Institucional y Proyectos Especiales). El Mtro. Barrios y la Lic. Corrales fueron enlaces directos, brindando en todo momento comprensión y empatía para la adecuada marcha del proyecto. El Lic. Mayorga, con sus buenos oficios y gran calidad humana, siempre vio con agrado este proyecto y gestionó muy eficazmente el seminario técnico llevado a cabo en Guadalajara. El Ing. Miguel Cervantes Díaz (director ejecutivo del Consejo Consultivo del Agua – Jalisco) contribuyó a que la visita a esta ciudad fuera muy agradable. Sin duda, el apoyo financiero de la Fundación fue muy importante; vale la pena señalar que todo este acompañamiento, de principio a fin, también lo fue.

También se tiene una deuda de gratitud con los directores de los organismos operadores de agua de Monterrey (Mtro. Eduardo Ortegón Williamson) y Guadalajara (Ing. Antonio Juárez Trueba) y el Subsecretario de Planeación y Proyectos de Ciudad de México (Mtro. Raúl López Corzo), quienes generosamente compartieron tiempo para conversar sobre la situación del agua y la infraestructura, brindaron información, y compartieron generosamente sus conocimientos en la conferencia internacional sobre envejecimiento de la infraestructura hidráulica. Esta conferencia, financiada por el proyecto, tuvo lugar el 20 de noviembre 2025 en el Tecnológico de Monterrey (Campus Monterrey).

Se reconoce el apoyo brindado por los participantes a los cuatro seminarios técnicos que se llevaron a cabo en Monterrey, Ciudad de México y Guadalajara. Su experiencia compartida en estas reuniones fue muy importante para orientar el proyecto y entender siquiera un poco más las complejidades involucradas con el envejecimiento de la infraestructura hidráulica. Esta participación involucró a funcionarios y técnicos actualmente con responsabilidad en la gestión de los temas correspondientes a este proyecto, así como a aquellos ya retirados de la vida pública y que gozan de un amplio prestigio profesional y calidad humana. En este contexto se resalta la valiosa conversación con el Ing. Ramón Aguirre Díaz.

Esta investigación contó con el firme respaldo del Tecnológico de Monterrey, a través de sus escuelas de Ciencias Sociales y Gobierno (ESCG) y de Ingeniería y Ciencias (EIC). El rector del Instituto, Mtro. Juan Pablo Murra Lascuraín, y el presidente del Campus Monterrey, Dr. Mario Adrián Flores, le dieron presencia institucional. El Tecnológico aportó tiempo de los profesores y brindó todas las facilidades e instalaciones para la realización del proyecto. De gran valía fue la gestión del Dr. Luis Alberto Serra Barragán, decano adjunto de Investigación y Desarrollo de Facultad de la ESCG, gracias a la cual se pudieron resolver diversas cuestiones administrativas sobre el desarrollo del proyecto. El Dr. Gabriel Aguilera López, decano región Monterrey de la ESCG, siempre vio con empatía y apoyó este proyecto. La Dra. Elvira Elena Naranjo Priego, directora del Departamento de Economía, brindó todas las facilidades de su competencia para la buena marcha de esta investigación, en torno a la cual siempre mostró entusiasmo.

La administración interna del proyecto contó con el inapreciable respaldo de varias personas, de distintas áreas del Tecnológico. Gracias a esta ayuda el trabajo técnico pudo avanzar. Joana Mayela Ibarra, también del Departamento de Economía, fue muy generosa para apoyar tareas logísticas del proyecto. El control interno fue llevado a cabo muy diligentemente por María Magdalena López Cárdenas, con la coordinación muy efectiva de Sayuri Villanueva Ríos, directora de Operaciones de Proyectos de Investigación. También se agradece la ayuda de la Mtra. Patricia Morris Alava, Gerente de Desarrollo Filantrópico.

La exitosa realización de la conferencia del 20 de noviembre en gran medida se debe al apoyo del Centro del Agua y de la Escuela de Ingeniería y Ciencias. Este trabajo refleja bien la colaboración interdisciplinaria e inter-escuelas, sobre la cual se fincó este proyecto de investigación. Además del equipo de apoyo para la realización del trabajo técnico, es de destacar la muy valiosa colaboración de las maestras Sheila Ivette Quintana Guerrero, Roxana Ivonne Fonseca Rodríguez y Ericka Toledo Zurita. No hay duda de que el éxito de la conferencia se debe a su trabajo comprometido. La liga a todos los materiales de la conferencia se encuentran alojados en el portal del Centro del Agua, en la siguiente liga: <https://centrodelagua.tec.mx/es/envejecimiento-infraestructura>

Desde un principio, para este proyecto, tanto por parte de la Fundación como del Tecnológico, la vinculación con el INEGI se pensó como esencial. Al final, esta premisa resultó muy acertada. Se tuvo la fortuna de sostener conversaciones tempranas sobre el origen, alcances y desarrollo del proyecto. Una actividad de gran trascendencia fue el taller que se llevó a cabo en la sede del instituto en Aguascalientes, el 12 de noviembre de 2025,

para explorar posibilidades de colaboración entre el Tecnológico de Monterrey y el INEGI sobre información y estudios relacionados con agua e infraestructura hidráulica nacional.

Esta reunión fue presidida por el Mtro. Mauricio Márquez Corona, vicepresidente del Sistema Económico, y contó con la asistencia de directivos y todos los especialistas del Instituto que trabajan las diferentes dimensiones del tema del agua. El taller fue conducido por la Dra. Laura Vázquez Maggio, directora general de Integración, Análisis e investigación. Entre la asistencia presencial y la conectada en línea participaron poco más de 40 directivos y especialistas del Instituto. Es justo señalar que gracias al Lic. Ricardo Rodríguez López, director de Organización de Seminarios de Investigación de INEGI (sede Ciudad de México), se pudo coordinar este taller de trabajo. De igual forma, se reconoce el apoyo brindado por los doctores José Alejandro Ruíz Sánchez y Ranyart Rodrigo Suárez Ponce de León (sede Aguascalientes) para la organización del seminario, en el primer caso, y la participación en la conferencia internacional ya referida.

De antemano se agradece también el interés del vicepresidente Márquez para llevar a cabo la segunda reunión acordada, para entonces estudiar cómo los resultados de nuestro proyecto pueden ser capitalizados por el INEGI en la generación y divulgación de información y datos sobre infraestructura hidráulica. A todas y a todos ellos les expresamos nuestra mayor gratitud. No solo por la muy buena recepción de nuestros resultados y la retroalimentación correspondiente, sino también por su generosidad para compartir el trabajo que el Instituto hace en el tema del agua en general y de infraestructura en particular. Para este proyecto fue una deferencia invaluable.

El reconocimiento mayor, a todas luces, es para nuestras familias. Llevar a cabo esta investigación implicó enormes sacrificios de tiempo, siendo ellas las principales afectadas. Su comprensión y apoyo irrestricto para sortear exigencias adicionales se aquilata en la medida en que este proyecto se acerque a las expectativas generadas.

Resumen Ejecutivo

La infraestructura hidráulica es esencial para el desarrollo económico y social de México, aunque su envejecimiento es un tema subestudiado en el país. Esta investigación, co-financiada por el Tecnológico de Monterrey (Tec) y la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA), aborda este tema tan importante. **El propósito central** de este trabajo fue **documentar el grado de obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México**. A su vez, el proyecto tuvo dos grandes propósitos más específicos:

- (1) Mejorar el conocimiento sobre el envejecimiento de la infraestructura;
- (2) Apoyar la construcción de una agenda de política pública sobre obsolescencia y mantenimiento de la infraestructura hidráulica en México.

El proyecto se desarrolló en dos escalas. Una nacional, centrada en documentar la edad de la infraestructura de estaciones hidrométricas y climatológicas, así como de captación (principales presas), conducción (principales acueductos). Si bien los datos son limitados, también se incluye a las plantas potabilizadoras y de tratamiento. La segunda escala se centró en las tres grandes metrópolis (Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara), para estudiar la edad de las redes de distribución de agua y de alcantarillado. Para ello, además de información documental, se llevaron a cabo reuniones y seminarios de trabajo con las autoridades responsables del suministro de agua a estas metrópolis.

La revisión de la literatura, y las conversaciones sostenidas con expertos sobre el tema, mostró que la mayoría de los enfoques y modelos – de los más sencillos a los más sofisticados - requieren **la edad** como variable esencial. En este sentido, se confirma lo atinado que fue seleccionar el tema del envejecimiento de la infraestructura para llevar a

cabo esta investigación. Sobre esta base se construyó el indicador *factor de envejecimiento* el cual se expresa como el cociente entre la edad de servicio de la infraestructura y su vida útil de diseño. Un asunto clave para retrasar el envejecimiento es el mantenimiento preventivo. Este es costoso, aunque la literatura y evidencia empírica muestran que es más costoso no tenerlo.

La gran conclusión de este informe es que México, tanto a nivel nacional como metropolitano, enfrenta grandes retos para gestionar la infraestructura hidráulica que envejece, sin suficiente información y con muy limitados recursos financieros. Las implicaciones de esta ecuación comprometen el desarrollo económico, social y ambiental, al seguir operando infraestructura que en muchos casos ya ha rebasado su vida útil. Los requerimientos financieros para la infraestructura hidráulica se van a magnificar ante los retos derivados del cambio climático. Infraestructura resiliente al clima y gestión del riesgo son los nombres del juego.

Se considera que a la luz de lo que se muestra como resultados, este proyecto efectivamente alcanza los propósitos y productos comprometidos (**Tabla RE1**). Por un lado, se alcanza el propósito de documentar el envejecimiento de la infraestructura de los sistemas seleccionados. Por otra parte, estos resultados proporcionan elementos para apoyar el diseño de políticas públicas más informadas sobre la sostenibilidad de la infraestructura hidráulica, tanto a nivel nacional como al de la tres grandes metrópolis. Se tiene la confianza de que este proyecto, con el apoyo de la Fundación y otros actores clave, pueda incidir en esta dirección. Un buen ejemplo de esto es la colaboración que se ha construido con el INEGI, cuyos detalles se pueden consultar en el **Anexo RE.3**.

Como es de esperar, el proyecto tiene limitaciones que es preciso subrayar. Si bien el indicador seleccionado es muy útil para medir el envejecimiento, sus alcances se tienen que analizar en contexto. Tanto la edad de servicio de la infraestructura como la vida útil tienen una naturaleza multifactorial y no son estáticas sino sujetas a condiciones cambiantes. Por otra parte, no se consideran los componentes de estos sistemas. Otros estudios podrían avanzar en esta dirección. La muestra de ciudades podría ampliarse o incluso detallar más las dinámicas de las metrópolis estudiadas. Otras ciudades son ciertamente de interés, como Saltillo (al tener el organismo participación privada). De hecho, originalmente se iba a considerar su inclusión en el estudio; sin embargo, ello habría puesto mucha más presión para llevar a buen puerto este trabajo. Tampoco se aborda el envejecimiento de la infraestructura hidroagícola. Este sería otro proyecto.

Se abren pues nuevas avenidas de investigación. Una de ellas es un estudio sobre las mejores prácticas internacionales para gestionar el agua no contabilizada (ANC) y el papel de las fugas. Aunque parece que sí, en México no se tiene una definición comúnmente aceptada sobre el ANC; no hay certeza sobre la validez de las cifras disponibles. Es también el caso de las fugas. Pareciera que solo se tienen estimaciones. Como se argumenta en esta investigación, es muy importante atender este tema pues de otro modo se incrementará la presión sobre la oferta de suministrar más agua. En relación con este punto, un tema subestudiado en la arena internacional y nacional es el costo de las interrupciones en los servicios de agua. Las pocas estimaciones disponibles sugieren cifras altas del PIB.

Tabla RE1 Proyecto Obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México. Compromisos y logros

Resultado comprometido	Indicador	Universo	Logros
1 Inventario sobre el grado de obsolescencia de la infraestructura	Grado de obsolescencia	Nacional y metropolitano	Se calculó el factor de envejecimiento expresado como la relación entre la edad de la infraestructura y su vida útil. El nivel nacional se presenta en Capítulo 4 y el de las tres metrópolis en Capítulo 5 .
2 Integración de bases de datos sobre la obsolescencia de la infraestructura	Base de datos con su manual de consulta	Nacional y metropolitano	El Anexo 3.1 contiene un análisis de los alcances y limitaciones de las fuentes de datos sobre envejecimiento de infraestructura en México. El Anexo digital 4 contiene, para el ámbito nacional: • Sistema de análisis de datos climatológicos e hidrométricos • Base de datos de presas y acueductos Por lo que se refiere al nivel metropolitano la información referida se encuentra en el Capítulo 5 .
3 Diseño de una métrica sobre la obsolescencia de la infraestructura hidráulica	Bateria de métricas	Nacional y metropolitano	La revisión de la literatura nacional e internacional, las consultas con expertos y operadores y la información disponible permitieron el diseño de la métrica única denominada Factor de envejecimiento, referido en el primer renglón de esta tabla. Esta métrica se aplica a la escala tanto nacional como metropolitana.
4 Realización de un seminario técnico especializado sobre el tema objeto de este proyecto	Seminario	Metropolitano	Realización de cuatro seminarios-taller: dos en Monterrey, uno en CDMX y otro en Guadalajara. El análisis e información más detallada de estos seminarios se encuentran en el Anexo RE.1
5 Conferencia latinoamericana sobre la obsolescencia de la infraestructura hidráulica	Conferencia	Latinoamericano	La conferencia tuvo lugar el 20 de noviembre de 2025 en Campus Monterrey del Tecnológico de Monterrey. La conferencia fue muy exitosa contando con 130 asistentes provenientes de diferentes sectores. El programa completo, las conferencias, los videos y fotografías se encuentran publicadas en https://centrodelagua.tec.mx/es/envejecimiento-infraestructura . El informe de los resultados se presenta en el Anexo RE.2
6 Preparación y publicación de dos artículos en revistas científicas de alto impacto	Artículo científico	Internacional	En proceso. Se tienen preseleccionadas las revistas <i>Water Resources Management</i> y <i>Sustainable Cities and Society</i> . Ambas revistas de alto impacto.

ANEXO RE.1

Informe sobre los Seminarios realizados en apoyo al proyecto

Desde la propuesta inicial del proyecto se concibió la idea de realizar un Seminario en Monterrey al que se invitaría a personal de los Organismos Operadores de las tres metrópolis que constituyen el caso de estudio. Esta actividad fue llevada a cabo con creces, puesto que se llevaron a cabo cuatro (4) Seminarios - Taller: dos en Monterrey, uno en Ciudad de México y otro en Guadalajara. Si se recuerda que el propósito del único seminario originalmente planteado era el de aprovechar la experiencia y conocimiento de los especialistas técnicos de dichas entidades como insumo para el proyecto, éste no solo fue cumplido sino superado, al realizar los cuatro eventos ya mencionados.

Seminarios-taller realizados

En la **Tabla 1** se consigna la información de los seminarios llevados a cabo. Resalta el hecho de que para Monterrey se realizó un primer evento con ingenieros ya retirados de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM), tanto del área de proyectos de ingeniería como de operación. Esto para aprovechar todo ese conocimiento adquirido durante más de 30 años. Este seminario taller especial se complementó con uno realizado con personal actual del organismo operador. Este mismo ejercicio se llevó a cabo en CDMX y Guadalajara, con personal actual de la Secretaría de Gestión Integral del Agua (SGIAGUA) y el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA), respectivamente. En los seminarios se contó con la presencia de los directores generales para el caso de SADM y SIAPA, y del Subsecretario de Planeación y Proyectos para el caso de Ciudad de México.

Tabla 1. Información de Seminarios Taller

Seminario	Metrópolis	Fecha	Sede	Asistentes
Experiencia	Monterrey	16/06/2025	Tecnológico de Monterrey, Monterrey	10
SADM	Monterrey	26/06/2025	Dirección General de SADM, Monterrey	8
SEGIAGUA	Ciudad de México	7/07/2025	Sala de Juntas SEGIAGUA, Ciudad de México	7
SIAPA	Guadalajara	14/10/2025	Dirección General de SIAPA, Guadalajara	6

Dinámica de las sesiones

Para todas las sesiones se siguió la misma dinámica, misma que se muestra en este informe y se describe a continuación.

- a) Se brindó información sobre el contexto del proyecto, así como el rol del Tecnológico de Monterrey y la Fundación Gonzalo Río Arronte
- b) Se expuso el propósito del ejercicio
- c) Se dio la palabra a cada uno de los asistentes para conocer su sentir inicial y se recopiló información de los asistentes, incluyendo su área de trabajo y su experiencia en el sector.
- d) Se trabajó con una ficha preparada exprofeso para el cada seminario taller. La ficha se incluye a final de este anexo.
- e) Se completaron las fichas en dos momentos: el primero versa sobre tres preguntas fundamentales para discusión:
 - ¿Qué tan vieja es la infraestructura hidráulica (presas, acueductos, potabilizadoras, redes de agua y drenaje, tratadoras)?
 - ¿Conoce de registros de mantenimiento de esta infraestructura?
 - De acuerdo con su experiencia, ¿sabe de fallas en esta infraestructura ante la posible falta de mantenimiento, si es que éste es el caso?
- f) El segundo momento es un ejercicio de consulta sobre la relevancia y mantenimiento de su propia infraestructura. Esto permite conocer la ponderación que otorgan a cada subsistema y conocer con cierto detalle la infraestructura vieja u obsoleta, así como las necesidades urgentes de rehabilitación, mantenimiento y sustitución.

Resumen de resultados

Uno de los resultados que conviene resaltar es la prioridad en la atención a problemas de infraestructura que cada organismo operado otorgó, de acuerdo con el tipo de sistema. La **Tabla 2** presenta, de manera simplificada la opinión general (basada en el promedio de las opiniones individuales) derivada de cada seminario. Se presenta un valor numérico indicando la prioridad identificada. Asimismo, se muestra un valor global para la metrópolis, mismo que debe tomarse con cuidado puesto como es notorio, varía en forma importante por cada gran ciudad, o incluso, en el caso de Monterrey, de los participantes en el ejercicio.

Tabla 2. Resumen de prioridades identificadas en los seminarios

Sistema	Monterrey Experiencia	Monterrey SADM	Guadalajara	CDMX	Global
Captación (presas y pozos)	1	5	1	1	1
Conducción (acueductos)	2	3	3	2	2
P. Potabilizadoras	5	6	1	5	5
Red de Agua Potable	4	2	3	3	3
Red de Alcantarillado	3	1	6	3	4
PTARs	5	4	3	6	6

Seminario con profesionistas expertos, Monterrey



Seminario con SADM, Monterrey

26 de junio de 2025
Experiencia: 2 a 25 años



Seminario en SEGIAGUA, Ciudad de México

7 de julio de 2025
Experiencia: 13 a 33 años



Seminario en SIAPA, Guadalajara



Agenda tipo de los seminarios taller (se muestra como ejemplo el caso SIAPA)



Proyecto
**Obsolescencia de la Infraestructura Hidráulica en México:
Retos y perspectivas**

*Consulta a Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y
Alcantarillado (SIAPA),
14 de octubre, 2025*

AGENDA

- I. Agradecimiento por llevar a cabo esta reunión (5 min)
- II. Contexto del proyecto (5 min)
- III. Tres preguntas fundamentales **para discusión** (45 min)
 1. ¿Qué tan vieja es la infraestructura hidráulica (presas, acueductos, potabilizadoras, redes de agua y drenaje, tratadoras)?
 2. ¿Conoce de registros de mantenimiento de esta infraestructura?
 3. De acuerdo con su experiencia, ¿sabe de fallas en esta infraestructura ante la posible falta de mantenimiento, si es que éste es el caso?
- IV. Ejercicio de consulta sobre relevancia y mantenimiento de la infraestructura (25 min)
- V. Comentarios finales

Ficha tipo utilizada

(se muestra como ejemplo el caso SIAPA)

Proyecto
**Obsolescencia de la Infraestructura Hidráulica en México:
 Retos y perspectivas**

*Consulta a Sistema Intermunicipal de los Servicios de Agua Potable y
 Alcantarillado (SIAPA)*

Nombre:
 Años de experiencia:
 Temas de su conocimiento en infraestructura hidráulica:

I ¿Cómo distribuiría usted 100 puntos, para mostrar la relevancia de cada
 componente de infraestructura hidráulica?

Componente	Puntos
1 Captación (presas y pozos):	
2 Conducción (acueductos):	
3 Potabilización (potabilizadoras):	
4 Redes	
4.1 Agua potable:	
4.2 Alcantarillado:	
5 Tratamiento (tratadoras):	
TOTAL	100

Comentarios (si los considera necesarios):

II ¿Qué obras o proyectos de infraestructura necesitan de mantenimiento, rehabilitación
 y/o reemplazo? Escriba en orden de prioridad y marque en la tabla con una X su
 selección.

Obra	Mante- nimiento	Rehabi- litación	Reemplazo
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Comentarios (si los considera necesarios):

ANEXO RE.2

Informe la Conferencia Internacional

Un entregable y resultado esperado del proyecto consistió en llevar a cabo una Conferencia Internacional sobre el tema de envejecimiento de la infraestructura hidráulica. En este evento, además de aprovechar el foro para compartir los avances del proyecto, se tuvieron participaciones tanto de expertos nacionales como internacionales, así como de autoridades de los organismos operadores de las tres metrópolis en estudio. Esto permitió contar de primera mano con las opiniones, experiencias e información sobre el tópico de estudio, lo que sin duda apoyó en el cierre del proyecto.

La conferencia se llevó a cabo en el Campus Monterrey del Tecnológico en un espacio muy propicio en el sexto piso de la Biblioteca, el 20 de noviembre de 2025. El programa se incluye en este documento. Como se puede apreciar, el evento se desarrolló en cuatro momentos principales. Después de la bienvenida, se presentó el avance del proyecto que desarrolló el Tecnológico de Monterrey con apoyo de la Fundación Gonzalo Río Arronte. En un segundo momento se tuvo el panel de metrópolis mexicanas. Se contó con la participación del M.I. Raúl López Corzo, Subsecretario de Planeación y Proyectos de las Secretaría de Gestión Integral del Agua de la Ciudad de México; el Ing. Antonio Juárez Trueba, Director General del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Guadalajara, y del Ing. Eduardo Ortegón Williamson, Director General de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey.

En un cuarto momento, se desarrolló el panel de *Lecciones de Experiencia en México*. En él participaron importantes personalidades del sector hídrico en México. Participaron el Ing. Ramón Aguirre Díaz, el Dr. Felipe Arreguín y el Ing. Florentino Ayala. Hacia la parte final del evento, tuvo lugar el bloque de Perspectivas Internacionales, moderado por el Ing. Abel Mejía Betancourt y en el que participaron Sandra Rodríguez, Gerente de las División de Agua y Saneamiento de la Unidad Reguladora de Servicios de Energía y Agua, quien se desplazó desde Uruguay. También participó el Ing. Dante Ragazzi Pauli, ex Superintendente de Planeación Integrada en la Compañía de Agua y Saneamiento del Estado de Sao Paulo (SABESP) en Brasil y el Dr. Carlos Tucci, Directo de Consultoría Rhama desde Porto Alegre. Para culminar el evento, el Dr. Ranyard Rodrigo Suárez, de INEGI, presentó una importante iniciativa de esa entidad, en torno a la caracterización de infraestructura con técnicas de percepción remota.

Los materiales de la conferencia (programa, presentaciones y los videos) están disponibles en el sitio principal del Centro del Agua del Tecnológico de Monterrey, en la liga <https://centrodelagua.tec.mx/es/envejecimiento-infraestructura>.

El evento contó con la participación de 130 asistentes, de los cuales 28 provinieron de la academia, 47 fueron estudiante, 24 de la iniciativa privada, 3 de organizaciones de la sociedad civil, 20 del sector público, y 8 del staff del Centro del Agua. La conferencia fue muy exitosa, a juzgar por las opiniones de los asistentes, varios de los cuales se desplazaron de otras ciudades del país. Altos directivos del Tecnológico también estuvieron presentes. Por otro lado, la Conferencia también brindó información relevante que pudo incorporarse en el reporte final el estudio.

Foto panel de *Lecciones y Experiencias en México*



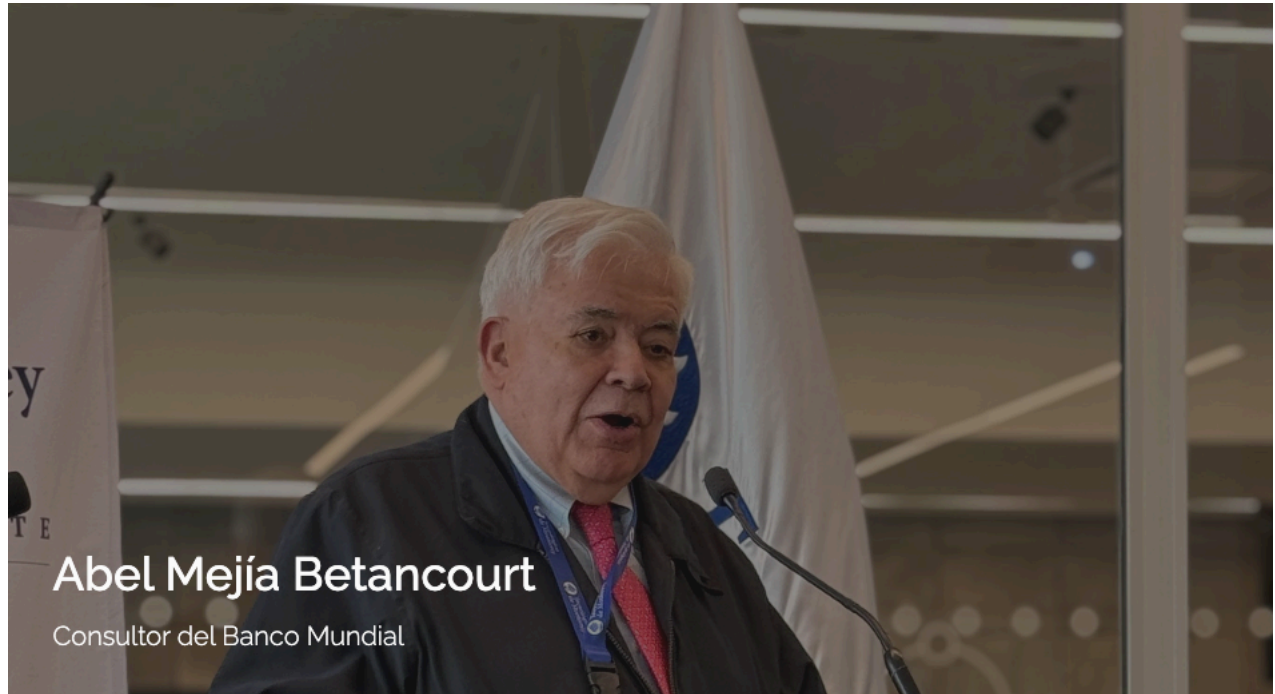
Participación de la Ing. Sandra Rodríguez, de URSEA, República del Uruguay



Participación del Ing. Dante Ragazzi, exsuper intendente de SABESP, Brasil



Participación del Ing. Abel Mejía



Ing. Antonio Juárez Trueba. Director General del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Guadalajara



Ing. Eduardo Ortegón Williamson. Director General de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey



M.I. Raúl López Corzo. Subsecretario de Planeación y Proyectos de las Secretaría de Gestión Integral del Agua de la Ciudad de México



Vista general de asistentes



ANEXO RE.3

Reunión Taller especial con personal de INEGI

El personal del Comité de Agua de la Fundación Gonzalo Río Arronte hizo patente la importancia de que los resultados del estudio tuvieran un impacto tangible en la sostenibilidad del recurso agua. En ese sentido, una de las acciones orientadas a este propósito fue la realización de una reunión taller especial con personal del Instituto Nacional de Estadística (INEGI), en la ciudad de Aguascalientes.

Esta reunión se llevó a cabo el 12 de noviembre de 2025 en la Sala de Juntas del edificio principal en la sede nacional del INEGI y llevó por nombre “Taller de exploración de posibilidades de colaboración entre el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) sobre información y estudios relacionados con agua e infraestructura hidráulica nacional”. Este título expresa muy bien la intención explícita del Instituto en apoyar nuestra investigación, por un lado, y explorar, como bien lo expresa el título del taller, posibilidades de colaboración con el Tecnológico (en el marco del proyecto Tec-FGRA).

Se agradece enormemente el apoyo e interés del INEGI para con el proyecto. Si bien el enfoque principal era el de infraestructura hídrica, tuvieron a bien invitar a prácticamente todas las áreas del Instituto con responsabilidad en la generación de información y estadísticas sobre agua. La realización de este taller representa una muestra muy generosa de confianza en nuestro trabajo y en este proyecto conjunto.

Fue una sesión híbrida con alrededor de 20 asistentes presenciales y un número similar en forma remota. El Taller se desarrolló de acuerdo con el programa anexo, que como se ve, estaba orientado a conocer los resultados preliminares del proyecto, pero también a exponer lo que INEGI realiza con el fin de buscar sinergias y colaboración. La reunión fue presidida por el Mtro. Mauricio Márquez Corona, vicepresidente del sistema económico del Instituto, y conducida por la Dra. Mónica Laura Vázquez Maggio, directora general de Integración, Análisis e Investigación. Es decir, INEGI le asignó a este proyecto una gran prioridad. Para el Instituto nuestro proyecto les es de interés y reconocen que tiene una muy importante trascendencia para México.

Este taller se planteó como el primero de dos para fortalecer las relaciones Tec-INEGI. Al final del taller, en el espacio para el dialogo abierto y acuerdos, se comentó la posibilidad de incorporar alguna métrica específica de la edad de la infraestructura o su mantenimiento en alguna de las encuestas que realiza el Instituto. Este tema se tocará en el segundo taller. Sin duda esto es una muestra muy clara del impacto de la investigación que el Tecnológico de Monterrey realizó, con el considerado apoyo de la Fundación Gonzalo Río Arronte.

Programa del Taller



Dirección General de Integración, Análisis e Investigación
Dirección General Adjunta de Investigación

10 de noviembre de 2025

Taller de exploración de posibilidades de colaboración entre el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) sobre información y estudios relacionados con agua e infraestructura hidráulica nacional.

Antecedentes

Desde 2022 el INEGI lleva a cabo una iniciativa para la integración y generación de información sobre infraestructura en México. A la fecha, la iniciativa ha logrado una definición de infraestructura; un catálogo de objetos, una ficha de atributos y un prototipo de visualizador de objetos de infraestructura. Ello ha posibilitado la integración de una plataforma que emerge como un esfuerzo innovador y sin precedentes en México, al ofrecer una solución geomática accesible al público que compila datos específicos sobre la infraestructura pública en el país.

La iniciativa continúa fortaleciéndose con trabajos de investigación y aprovechamiento de nuevas tecnologías y fuentes de información. En este marco, resulta relevante conocer los avances que, desde el sector académico, se han logrado. En esta ocasión, se presentará el desarrollo realizado por investigadores del ITESM sobre infraestructura hídrica.

Objetivo

Explorar oportunidades de colaboración y de comunicación de información que el INEGI tiene disponibles para el sector académico sobre este tema.

Programa

Primera sesión: 12 de noviembre de 2025, 11:00 a 12:45.

Formato: Presencial en sala 8 del Salón de Usos Múltiples del Edificio Sede, Aguascalientes y virtual por *Teams* [aquí](#).

Inauguración y bienvenida (3")

Mauricio Márquez Corona, vicepresidente de INEGI (C).

Introducción (3")

Mónica Laura Vázquez Maggio, directora general de Integración, Análisis e Investigación, INEGI (PC).

Presentación de los asistentes (2")

Obsolescencia de la Infraestructura Hidráulica en México. Retos y Perspectivas, ITESM (10")

Ismael Aguilar Barajas, profesor e investigador, Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey ITESM (C).

Aldo Iván Ramírez Orozco, director del Centro de Agua y profesor e investigador, Escuela de Ingeniería y Ciencias, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey ITESM (C).



Preguntas y respuestas (5")

Conjunto de Datos Vectoriales de Información Topográfica (15")

Tema: capas de información relacionados con agua.

Francisco Javier Medina Parra, director general adjunto de Información Geográfica Básica, Unidad de Geografía y Medio Ambiente, INEGI (C).

Preguntas y respuestas (5")

Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) (15")

Temas: rasgos hidrográficos, red hidrográfica, datos climáticos e hidrométricos, gestión municipal medio ambiente.

Rubén David Carrasco Esparza, jefe de departamento de Análisis Espacial, Dirección General Adjunta de Integración de Información Geoespacial, Unidad de Geografía y Medio Ambiente, INEGI (C).

Preguntas y respuestas (5")

Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales en la CDMX (CNGMD) (15")

Temas: servicio de agua de la red pública, captación de agua para abastecimiento público, plantas de potabilización, administración, drenaje y alcantarillado, tratamiento de aguas residuales, aguas residuales municipales sin tratamiento, programas orientados a la gestión sustentable del servicio de agua de la red pública, difusión de información y opinión de usuarios en la gestión del servicio de agua y saneamiento.

Sergio Enrique Macías Hernández, jefe del Departamento de Estadísticas de Levantamiento de Datos sobre el Medio Ambiente, Dirección General Adjunta de Recursos Naturales y Medio Ambiente, Unidad de Geografía y Medio Ambiente, INEGI (C).

Preguntas y respuestas (5")

Censos Económicos (CE) (15")

Tema: captación, tratamiento y suministro de agua.

José Luis Mercado Hernández, coordinador de Tratamiento de la Información, Dirección General Adjunta de Censos Económicos y Agropecuarios, Unidad de Estadísticas Económicas, INEGI (C).

Preguntas y respuestas (5")



Segunda sesión: fecha por definir.

Formato: virtual por *Teams*.

Censo de Población y Vivienda (CPyV) y Encuesta Intercensal (EIC)

Temas: servicios básicos e instalaciones sanitarias, acceso al agua e instalación sanitaria y saneamiento.

Dirección General Adjunta del Censo Población y Vivienda, INEGI (PD).

Encuesta Nacional de los Hogares (ENH) y Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares (ENIGH)

Tema: servicio de agua.

Dirección General Adjunta de Encuestas Sociodemográficas, INEGI (PD).

Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG)

Tema: acceso al agua potable, drenaje y alcantarillado, tratamiento y disposición de aguas residuales.

José Antonio Gallegos Urenda, director de Modelos de Información Gubernamental, Dirección General Adjunta de Encuestas Nacionales de Gobierno, Seguridad Pública y Justicia, INEGI (C).

Rasgos de la cartografía de vegetación relacionados con el agua

José Luis Ornelas de Anda, investigador H Dirección General Adjunta de Investigación, Dirección General de Integración, Análisis e Investigación, INEGI (C)

Diálogo abierto y acuerdos

(C) Confirmada.

(PD) Por definir.



Fotografía de los asistentes presenciales



1

Introducción

“Aun cuando se reconoce que México cuenta con un amplio sistema de infraestructura hidráulica, en la mayoría de los casos, se desconoce exactamente el número de sus componentes, sus características principales y su estado actual. Lo anterior imposibilita el desarrollo de una planeación a largo plazo, al ejecutar programas de operación, mantenimiento y sustitución bajo principios de eficiencia presupuestaria y el evaluar su resiliencia ante los efectos del cambio climático”
(González Villareal et al, 2022, pp. 71-72)

“...Hoy es el tiempo de tomar decisiones (sobre los enormes retos que México tiene en materia de agua), mañana puede ser demasiado tarde (Aldama, 2004. P. 31)

1.1 Antecedentes del proyecto

Como parte del proyecto *Medición de Infraestructura*, realizado para el INEGI, y coordinado por el Programa Universitario de Desarrollo de la UNAM, se elaboró el estudio *Estadísticas y Métricas sobre Infraestructura Hidráulica* (Aguilar y Ramírez, 2023). Uno de los grandes hallazgos de este trabajo fue que el tema de la obsolescencia / envejecimiento de la infraestructura hidráulica está sub estudiado en México. Como se demuestra, lo anterior se confirma en los resultados de la investigación que ahora se presenta, y el análisis de soporte realizado para la misma. Más específica y literalmente, este estudio encontró: (1) no hay un estudio integrado sobre el grado de obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México; y (2) es necesario documentar este deterioro y su consideración en políticas públicas más informadas, especialmente en torno al mantenimiento y reposición de activos, y su financiamiento.

Sobre esta base se propuso a la Fundación Gonzalo Río Arronte cofinanciar, con el Tecnológico de Monterrey, este estudio sobre la obsolescencia de la infraestructura hidráulica. El proyecto fue aceptado e inició formalmente en octubre de 2024. Por parte del Tecnológico este trabajo se realizó a través de la Escuela de Ciencias Sociales y Gobierno (ECSG) y la Escuela de Ingeniería y Ciencias (EIC). En la práctica el proyecto se coordinó por el Dr. Ismael Aguilar Barajas (ECSG) y el Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco (EIC), quien además funge como director del Centro del Agua. Desde un principio, para el Tecnológico de Monterrey este proyecto ha sido de una gran relevancia.

Ejemplo de ello es el hecho de que en el marco del día mundial del agua, la revista de divulgación científica del Tecnológico *TecScience* publicó un reportaje sobre este proyecto (abril 28, 2025).¹ En la publicación se señala el carácter interdisciplinario de esta investigación, orientada a conocer la calidad de la infraestructura del agua en el país y la propuesta de soluciones basadas en evidencia científica. Además, con motivo del día mundial del medio ambiente, el Rector de la Institución, Juan Pablo Murra, se refirió a este proyecto como una contribución científica de frontera para abordar uno de los desafíos más urgentes de nuestro país: la crisis del agua. Más particularmente, se señaló que este proyecto propone un nuevo enfoque para analizar y replantear el papel de la infraestructura hídrica hacia modelos más sostenibles y resilientes.²

En este contexto, **el propósito** del estudio fue documentar el grado de obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México, el cual compromete su desarrollo económico y social. Más específicamente, los resultados de este proyecto se enmarcan en dos grandes avenidas: (1) Mejorar el conocimiento sobre el envejecimiento de la infraestructura; y (2) Apoyar la construcción de una agenda de política pública sobre obsolescencia y mantenimiento de la infraestructura hidráulica en México. En el resumen ejecutivo se ha mostrado ya los alcances del proyecto en estas dos avenidas. En el capítulo concluyente

¹ Esta es la fuente de publicación. <https://tecscience.tec.mx/es/ciudades-y-comunidades-prosperas/infraestructura-del-agua-en-mexico/>

² Esta es la fuente de referencia. <https://www.linkedin.com/posts/juan-pablo-murra-revertir-el-futuro-de-la-crisis-del-agua-activity-7336464005961588736-H7TO/?originalSubdomain=es>

se detallan sus recomendaciones e impactos. En la sección 1.5 se retoma el propósito del proyecto y su aportación a las dos avenidas referidas.

1.2 Agua, infraestructura y desarrollo

El acceso al agua es un tema de interés nacional, y factor condicionante del desarrollo económico, social y ambiental de México. Como explícitamente lo sostiene el informe 2023 del Instituto Mexicano para la Competitividad (**IMCO, 2023a**), su disponibilidad es, efectivamente, crucial para el crecimiento y desarrollo del país, así como de su competitividad. Más particularmente, un reporte reciente del Instituto subraya que la infraestructura hidráulica representa un factor estratégico para el desarrollo nacional (**IMCO, 2024a**). Esto también se argumenta para el contexto latinoamericano y del Caribe (**OECD, 2024a**). Por obvio que parezca, para las actuales y nuevas oportunidades de inversión nacional e internacional la disponibilidad del recurso agua es absolutamente indispensable.

La inversión en infraestructura en general e hidráulica en particular demanda muchas tareas. Como bien lo señala **Moreno Pérez (2023, p. 2)**, desde la concepción hasta la construcción y explotación, el trayecto de los proyectos está plagado de obstáculos y dificultades. Un estudio reciente de la **OCDE (OECD, 2024b)**, sobre buenas prácticas en torno a la calidad de la infraestructura y los desastres naturales, adopta el enfoque del **ciclo de vida de la infraestructura**, el cual enlaza la planeación con el diseño, la operación y el mantenimiento. El mantenimiento preventivo se considera como una estrategia prudente y financieramente más sostenible que dedicar fondos limitados a la operación y conservación de las obras. Como bien lo señalan **Frangopol y Tsompanakis (2024)**: El mantenimiento de la infraestructura que envejece es una **cuestión de seguridad** (nuestro énfasis).

Dada su transversalidad, los problemas del agua no pueden ser resueltos solo desde dentro del sector o por la CONAGUA. Es por ello que atender estos desafíos requieren una gobernanza hídrica más coordinada, y financieramente más robusta. Mejor planeación y gestión son los nombres del juego. Esto conduce a la necesidad de invertir en mejores datos sobre recursos hídricos y en el financiamiento de la infraestructura. Lo anterior es uno de los mensajes centrales del estudio económico 2024 de la OCDE sobre México (**OECD, 2024c**). Lo anterior es un buen marco para la realización de este proyecto.

Hace ya 20 años el Banco Mundial daba tres razones por las que la infraestructura de agua y saneamiento era importante para México (**World Bank, 2005**). La primera es que impacta el crecimiento, el comercio, y la competitividad. Tiene, además, una importancia social en términos de reducción de la pobreza. La tercera razón es que pone a prueba la importancia expresada por el Gobierno en el tema. La siguiente frase indica que el país no pasaría esta prueba.

“Hace tiempo se me ordenó hacer un plan; la dificultad era financiarlo, cruzarlo con el presupuesto disponible en materia de agua” (Ramón Aguirre Díaz, ex Director General del Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en Aguirre Díaz (2014, p. 20)

Es decir, el país llega tarde a enfrentar sus retos de infraestructura hidráulica. Más aún, como se desprende de la experiencia internacional (**OECD, 2019**), se requiere un cambio de paradigma: pasar de la protección de activos a resiliencia sistémica, la cual requiere de inversiones *ex-ante*, como parte de enfoques más comprensivos e integrados. Esta exigencia va a contracorriente de lo que ha venido ocurriendo en México en relación con el financiamiento hacia el sector agua.

Frente a un contexto complejo y de grandes requerimientos financieros, el agua no es un tema prioritario para México; así lo indica el presupuesto para el sector (**Athie Flores, 2022**). Frente a exigencias crecientes de recursos financieros para abordar el envejecimiento y conservación de su infraestructura, México ha venido disminuyendo los presupuestos para atender estas exigencias. Como se muestra en esta investigación, en términos reales el presupuesto de la CONAGUA de los últimos 15 años, por ejemplo, presentan una muy sensible tendencia a la baja. Los presupuestos aprobados para 2025 y 2026 refuerzan esta tendencia.

Hace ya poco más de 30 años el Banco Mundial dedicó su informe anual del desarrollo a la infraestructura. El título sigue teniendo vigencia para mostrar la relevancia del tema: *Infraestructura para el Desarrollo*. Como bien se argumentaba entonces para la arena internacional – y que se aplica bien a México – la cantidad de inversión no puede ser el único eje de las políticas (**Banco Mundial, 1994**). Es fundamental mejorar la calidad de la infraestructura, alineando los incentivos en esta dirección. En este sentido, es importante subrayar que la buena gestión de la infraestructura pasa por la mayor y mejor disponibilidad de datos e información. Esta es una premisa central para la realización de esta investigación Tec-FGRA sobre la necesidad de saber más sobre el envejecimiento de la infraestructura hidráulica.

1.3 Importancia del tema del envejecimiento de la infraestructura

1.3.1 Arena internacional

De libro de texto se sabe que la planeación de la infraestructura hídrica se enmarca en el ciclo de vida de los proyectos (**Grieg, 2023**). Este ciclo se refiere a las fases o etapas de diseño, construcción, operación y mantenimiento, renovación, planeación y vuelta al diseño (p. 204). En este sentido, conocer la edad de servicio de la infraestructura es esencial para entender su ciclo de vida. La edad es también importante porque los sistemas de infraestructura hidráulica son intensivos en capital y duran muchos años, por lo cual se dificulta su financiamiento y ejecución. Aquí, por lo tanto, el tema del presupuesto reviste una relevancia fundamental.

La experiencia internacional muestra que con el envejecimiento de las presas – 50 a 100 años –, por ejemplo, se incurre en costos de mantenimiento muy significativos, mientras que hay simultáneamente un declive en la funcionalidad efectiva, lo cual constituye una amenaza a la seguridad humana y ambiental (**Perera et al, 2021**). Los países más desarrollados han

dedicado más esfuerzos a la rehabilitación y reemplazo de activos, así como a la relevancia del financiamiento correspondiente (**Rodríguez Tirado, 2021**). El adecuado mantenimiento de la infraestructura es una vía para sostener o incluso ampliar la vida útil de las obras, al atender oportunamente fallas en la operación.

No obstante su relevancia para el desarrollo de los países, en general se le presta una muy limitada atención al envejecimiento de su infraestructura. Como bien lo sustenta la Asociación de Ingenieros Civiles de los Estados Unidos (ASCE, por sus siglas en inglés), en su reporte 2025 (**ASCE, 2025**), el país tiene sistemas de infraestructura que envejecen, que no hay suficientes recursos y que faltan datos.

Como lo sostiene **Spaniel (2023)**, se responde muy lentamente para asegurar la infraestructura crítica del país. **Gerstell (2023, p. ix)** lo subraya más nítidamente: *“Somos lentos para abordar un problema conocido”*. Se tienen por lo menos dos, o más décadas, con análisis serios sobre los problemas de la infraestructura, repletas de graves ilustraciones de como se ha sistemáticamente sub invertido en casi todos los sectores de infraestructura. (p. ix). No se deben desatender la larga lista de deficiencias acumuladas y seguir desprevenidos ante el futuro (p. x)

1.3.2 México

En México se reconoce ampliamente que, como ocurre en la arena internacional, las inversiones en infraestructura en general y la hidráulica en particular son esenciales para el crecimiento económico (**Baena Ordaz, 2021; Rodríguez Tirado, 2021**). También se sabe que las carencias en infraestructura son más grandes que los recursos disponibles. La vida útil de los proyectos de infraestructura puede superar los 50 años y los riesgos durante este tiempo pueden ser muy grandes, lo cual generalmente se asocia con una planeación insuficiente. Más particularmente, este es el caso de la inadecuada consideración, desde un principio, de la operación y el mantenimiento (O&M). Esto, a su vez, va a afectar el acceso al financiamiento de los proyectos.

No obstante la relevancia de la infraestructura, en México se le brinda muy poca atención al entendimiento de su envejecimiento y adecuado mantenimiento (**Rodríguez Tirado, 2021**). Esto sorprende ya que la edad de la infraestructura se asocia con un mal funcionamiento de la misma, lo que termina generando un mal servicio (**Robledo Cabello, 2021**). Poco más del 47% del agua que entra a las tuberías es una pérdida física por fugas y tuberías obsoletas (**Muñoz, Alvarez, 2022**). Por otra parte, un diagnóstico de la seguridad de presas necesita considerar **el envejecimiento** de las obras (nuestro énfasis). Algunas de ellas tienen más de 100 años de edad (**Santillán Doherty, 2022**).

Si bien no es el único factor, el final de la vida útil puede incidir – junto con otros factores – en dejar fuera de servicio las obras. Es en este contexto que este proyecto cobra relevancia, al documentar la edad de la infraestructura hidráulica en el país, y entonces, con base en evidencia, integrar un diagnóstico más comprensivo sobre el funcionamiento de la infraestructura y de los riesgos de su operación más allá (o mucho más allá) de su vida útil).

1.4 Justificación de la investigación

A pesar de que se reconoce su relevancia, el envejecimiento/obsolescencia de la infraestructura hidráulica es un tema sub estudiado en México. A la luz de la significancia del tema, sorprende mucho esta ausencia. Si bien hay disponibilidad de información en fuentes oficiales – como CONAGUA e INEGI - no se tiene una base de datos integrada y **accesible** que pudiera orientar la toma de decisiones en torno a cuándo proporcionar mantenimiento, rehabilitación menor o mayor, o el reemplazo de activos. Abordar lo anterior en políticas públicas informadas requiere conocer, entre otras variables, **la edad de la infraestructura**. Como se muestra en la investigación, se tuvo que hacer mucho trabajo para obtener, ordenar y procesar datos y convertirlos a información que sea útil. Esta es una de las grandes aportaciones de este proyecto Tec-FGRA.

El tema del envejecimiento de la infraestructura tampoco parece analizarse en libros académicos con la significancia que lo amerita. El **Anexo 1** contiene un análisis de los contenidos de 20 libros en torno al agua en México. Ciertamente se tienen aportaciones de fondo para el entendimiento de la problemática y soluciones en torno al agua. Sin embargo, salvo contadas excepciones ((como en **Perló Cohen y Castro-Reguera (2018)** y **González Villarreal et al, 2022 y 2024**)) el tema de la infraestructura hidráulica no se aborda y mucho menos lo concerniente a su envejecimiento.

En **González Villarreal et al (2022)** se encuentran preguntas muy importantes que confirman la valía de llevar a cabo este proyecto de investigación Tec-FGRA. Esta publicación, resultado de una iniciativa entre la UNAM y Agua Capital, contiene los resultados de un taller de expertos, en torno al panorama del agua en México y sus principales retos. Este taller tuvo lugar el 6 de mayo de 2022. El Taller se estructuró en torno a cinco grandes preguntas. La primera se refiere a los principales desafíos del sector hídrico en México. De interés para nuestra investigación se tienen los siguientes puntos:

- Incrementar la medición
- “Aumentar los niveles de mantenimiento, renovación y resiliencia de la infraestructura hidráulica en operación, gran parte de la cual ha sobre pasado su vida útil
- Incrementar y diversificar las fuentes de financiamiento (incluyendo las privadas)

La pregunta #3 se centra explícitamente sobre los principales desafíos en materia de infraestructura hidráulica y su mantenimiento. Esta pregunta se desagrega, a su vez, en cuatro asuntos. El número 2 se asocia directamente con la lógica para realizar este proyecto de investigación. La expresión textual de este punto se incluye arriba al inicio de esta introducción.

Se tienen otros antecedentes que muestran la valía de realizar este proyecto Tec-FGRA. Es ilustrativa la referencia a un ejercicio de consulta al equipo directivo llevado a cabo por la CONAGUA en la primera quincena de diciembre de 2008, sobre cuáles deberían ser las iniciativas estratégicas. No sorprende que la medición haya tenido una muy alta relevancia (quinta posición, aunque muy cerca de la primera) (**CONAGUA, 2009**). Textualmente, el ejercicio enfatizó la necesidad de automatizar y ampliar las redes de medición climatológica,

hidrométrica, piezométrica y de calidad del agua. Todo con la intención de contar con bases de datos de calidad. La creación de un efectivo sistema de indicadores de gestión también ocupó una posición de relevancia.

Sin embargo, la construcción de una métrica sobre la calidad de la infraestructura hidráulica es compleja. La principal limitante es la ausencia o insuficiencia de información (**Tzatchkov et al (2022, p. 18)**). Hay variables que no se miden en México. Textualmente, los autores argumentan que en el país, “...Existe una ausencia de medición, seguimiento y procesamiento de datos, e información asimétrica en diferentes niveles agregados (estatal y municipal)”. Si bien hay disponibilidad para ciertos subcomponentes, como las presas y principales acueductos, en general en el país no se mide la obsolescencia de la infraestructura hidráulica. El caso de México muestra lo que se encuentra en la arena internacional, sobre la limitada información en este tema. Como lo expresaban **Selvakumar y Tafuri (2012, p. 209)** hace más de 20 años para el contexto internacional, “...se tienen muchos datos, pero estos deben ser reformateados, agrupados y analizados para que sean útiles. (p. 209).

Varias revistas del gremio de la ingeniería, como *Ingeniería Civil* (publicada por El Colegio de Ingenieros Civiles de México), si abordan el tema de la infraestructura hidráulica; algunas contribuciones tocan el tema de su envejecimiento. Muchos de sus artículos se centran sobre la imperiosa necesidad del mantenimiento y rehabilitación. No obstante, hay grandes huecos en la documentación y análisis del envejecimiento de los diferentes sistemas de infraestructura hidráulica. La Revista H2O, publicada por el Servicio de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), proporciona información y análisis muy ricos sobre, especialmente la Ciudad de México, pero sin llegar a proporcionar una historia más completa y sistematizada sobre el envejecimiento de su infraestructura hidráulica. Es de subrayar que la consulta de estas revistas fue de un inmenso valor, tanto para darse cuenta de que valía la pena investigar el tema central de este proyecto, así como para comprender siquiera un poco las complejidades asociadas con la temática, algo que sí se presenta en las revistas.

Un hallazgo que también sorprendió es que hay una marcada ausencia de trabajos publicados sobre Monterrey y (menos aún de) Guadalajara. La Ciudad y el Valle de México dominan la escena. Aquí se presenta una avenida de oportunidad para incorporar a estas dos metrópolis en la arena nacional. En este sentido es muy ilustrativo referir la conferencia, que en el marco de este proyecto Tec-FGRA, tuvo lugar en el Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, el 20 de noviembre de 2025. El Título de la conferencia está directamente relacionado con el proyecto: *Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. México y perspectivas internacionales*. Una parte central de la conferencia fue un panel sobre las tres grandes metrópolis de México. Esto fue muy significativo pues es muy raro que haya eventos sobre agua en que se presenten conjuntamente los casos de Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara. La otra característica es que estas experiencias hayan sido abordadas directamente por las autoridades responsables de la gestión del agua en estas metrópolis. En el resumen ejecutivo se detalla lo exitosa que fue esta conferencia, para lo cual este panel contribuyó de gran manera.

Como contexto a la problemática a estudiar en esta investigación, en diciembre de 2013 el Sistema de Aguas de la Ciudad de México /SACMEX) y la UNAM organizaron el Foro *La*

crisis del agua en la Ciudad de México: retos y soluciones. Este evento contó con la asistencia de 100 distinguidos especialistas, para abordar la compleja problemática y aportar criterios de solución. Los principales resultados fueron publicados por la revista H2O (producida por SACMEX), en el número 3, de julio-septiembre 2014, pp. 26-31. Las discusiones de las mesas del Foro son relevantes como referente de lo que hace poco más de 10 años se discutía como problemas y vías de solución.

Para este proyecto Tec-FGRA, centrado en la investigación del envejecimiento de la infraestructura hidráulica, dos de ellas son de particular interés (Mesas 2 y 4). Las preguntas rectoras sobre las que se centraron las discusiones también son de interés tanto para la CDMX como para el país en su conjunto. El espíritu de estas preguntas fue muy importante para sustentar la validez de este proyecto, sobre una temática – entonces y ahora – sub estudiada en México. La Mesa 2 se centró sobre la mejora de la infraestructura, y estructuró en las siguientes preguntas:

- ¿Qué porcentaje de la infraestructura hidráulica, de obra civil y electromecánica, habría que reponer o rehabilitar?
- ¿Qué vida útil y económica es conveniente considerar para la infraestructura hidráulica de la ciudad?
- ¿Qué acciones deberían impulsarse como mínimo para mejorar la infraestructura y la calidad de los servicios de agua, drenaje, reúso y tratamiento de la ciudad?

La Mesa 4 abordó los temas de economía, finanzas y financiamiento de la infraestructura. La pregunta central de la mesa fue la siguiente:

- En un escenario de recursos escasos, ¿cuáles deben ser los criterios para asignar inversión al mantenimiento y construcción de nueva infraestructura?

Estas preguntas guía, como se muestra abajo, y las discusiones de las mesas guardan correspondencia con el propósito de este proyecto de investigación cuya estructura aborda parte de las interrogantes.

1.5 Propósito del proyecto y resultados principales de la investigación

1.5.1 Propósito y principales avenidas de contribución del proyecto

Con base en todo lo anterior, **el propósito** del estudio fue documentar el grado de obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México. Más específicamente, Los resultados de este proyecto se enmarcan en dos grandes avenidas: (1) Mejorar el conocimiento sobre el envejecimiento de la infraestructura; y (2) Apoyar la construcción de una agenda de política pública sobre obsolescencia y mantenimiento de la infraestructura hidráulica en México. A continuación, se presenta el contenido del informe y se aprovecha para presentar una síntesis de los principales resultados relacionados con la primera avenida.

Sobre la segunda avenida, en el capítulo final se incluyen las principales recomendaciones e impactos derivados de este proyecto, entre los cuales se subraya la relación establecida con INEGI, al más alto nivel de decisión y técnico, para que el Instituto capitalice los resultados de esta investigación. Se destaca también la aportación al Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (dependiente de la CONAGUA), del análisis realizado en el capítulo 4 sobre la edad de las estaciones climatológicas e hidrométricas, así como la porosidad de las bases de datos correspondientes.

1.5.2. Estructura, contenido y resultados del informe

Este informe se estructura en ocho capítulos. Esta introducción constituye el primero. La revisión de la literatura realizada en el **capítulo 2** fue muy importante para la construcción de un marco analítico en torno a los principales asuntos asociados con el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y las métricas relacionadas. Fue de gran utilidad la conceptualización de infraestructura hidráulica como parte de un sistema interdependiente o como sistemas de infraestructura.

Esta revisión ayudó a orientar el diseño metodológico de esta investigación el cual se detalla en el **capítulo 3**. Se encuentra que el **factor de envejecimiento** (FE) - expresado como la edad de servicio en relación con la vida útil de diseño - es un buen indicador para analizar la relativa obsolescencia de la infraestructura. La selección del indicador para medir el envejecimiento de la infraestructura fue posible gracias a un análisis cuidadoso de los marcos, modelos y métricas que se presentan en la literatura nacional e internacional. Como se expresa en el capítulo, a menudo el problema con la medición no son los datos sino los marcos de análisis y su interpretación en contexto.

Desde las métricas más sencillas hasta los modelos más complejos tienen a **la edad** de la infraestructura **como variable clave**. Se reconoce, por supuesto las complejidades detrás del proceso de envejecimiento y de la naturaleza multifactorial de estas dos variables. Un factor de 1.0 significa que ambas variables son iguales. Valores de FE superiores a 1.0 indican que la edad de servicio rebasa la vida útil. La expresión más directa de la metodología se refleja en los capítulos 4 y 5, donde se aplica el factor de envejecimiento de sistemas de infraestructura seleccionados, tanto en la escala nacional como de las tres grandes metrópolis del país

Además, los capítulos 2 y 3, a la luz de la literatura nacional e internacional, brindan elementos para entender las difíciles decisiones que se tienen que tomar para mejorar la infraestructura, y abordar las también difíciles preguntas de en qué y cómo se invierte, ante las existentes y potenciales restricciones financieras. Es también importante señalar que además del análisis de la literatura nacional e internacional, los seminarios con expertos y responsables de los organismos de agua de las tres metrópolis, las consultas especializadas y la conferencia del 20 de noviembre de 2025, fueron insumos muy importantes para orientar la investigación, dar sentido a los hallazgos y entender un poco más las grandes complejidades asociadas con el tema de la investigación

Los **capítulos 4 y 5** constituyen un esfuerzo para documentar, por primera vez en México, el envejecimiento de la infraestructura hidráulica nacional y de las tres grandes metrópolis (Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara). Estos capítulos contienen la evidencia empírica de que el país tiene una infraestructura que se está avejentando. Se ha encontrado que en la mayoría de los subsistemas de infraestructura hidráulica su vida de servicio ha superado su vida útil. Por ejemplo, las edades promedio para las estaciones climatológicas e hidrométricas es de 54 y 50 años, respectivamente. Llegar a estos resultados fue una tarea muy demandante. Fue necesaria la construcción de un algoritmo para extraer de las bases de datos de CONAGUA y del SMN el año de inicio de cada estación. Además de lo anterior, también se calculó la porosidad de la nueva base de datos creada. Al analizarse frente a su vida útil, se encuentra que, por ejemplo, el factor de envejecimiento para las estaciones es de 1.35 y 1.25, en el mismo orden. Si se toma en cuenta que entre los dos tipos de estaciones se tienen más de 9 mil registros, entonces se comprenderá el trabajo invertido. Hasta donde sabemos, no hay en el país una investigación actualizada como la que aquí se presenta, no solo a escala nacional sino también por entidad federativa y región hidrológico-administrativa.

Estos resultados también se tienen para las 208 principales presas (edad promedio de 67 años) y los acueductos (edad promedio de 47 años), así como para una muestra reducida de las plantas tratadoras (edad promedio de 19 años). En el primer caso, más de dos terceras partes del total, han superado ya su vida útil y continúan en operación. Por lo que se refiere a los acueductos, su edad promedio es de 34 años. Si bien lo anterior indica que no se ha alcanzado el umbral de vida útil (estimada, en general en 40 años), el 40% de esos sistemas ya la han superado. Esto representa un foco rojo ante la crucial función que cumplen de llevar agua a las ciudades. El hecho de que más de la mitad de ellos supere los 35 años, sugiere la necesidad de un ejercicio de revisión y la aplicación de un plan de monitoreo más estricto. El factor de envejecimiento de las presas es de 1.4 y el de los acueductos de 0.85. El factor de las plantas tratadoras es de 0.55

A nivel de las tres grandes metrópolis del país se pudo estimar las edades de servicio de las redes de distribución de agua y de alcantarillado, así como de sus plantas potabilizadoras y tratadoras. El envejecimiento de la infraestructura hidráulica de las tres grandes metrópolis muestra un patrón diferenciado. Para el caso de la Ciudad de México, las fuentes y acueductos, así como el sistema de alcantarillado son los más preocupantes el tener factores de envejecimiento de 1.33 y 1.33, respectivamente. En Monterrey el problema es menor que en CDMX, pero ya es necesario realizar estudios prioritarios en plantas potabilizadoras (FE de 1.29), acueductos (FE de 0.91) y presas (FE de 0.89). Finalmente, para el caso de Guadalajara, de acuerdo con los valores del FE, los acueductos y la red de distribución de agua potable están muy ligeramente por encima del 1.0. Esto significa que su edad de servicio se está igualando con su vida útil. Si se habla de las tres metrópolis en conjunto, los problemas se centran principalmente en acueductos y plantas potabilizadoras. En el capítulo 5 también se encuentra que el patrón de envejecimiento está espacialmente diferenciado dentro de las metrópolis. Las tres ciudades cuentan con redes muy antiguas, especialmente en los centros históricos de las mismas.

Una de las grandes conclusiones de esta investigación, por obvia que parezca, es que al final del día el financiamiento se convierte en una de las más grandes limitantes para atender tanto la infraestructura que envejece como la nueva. Los **capítulos 6 y 7** se centran sobre este gran tema, particularizando el financiamiento para la infraestructura resiliente al clima. Este reconocimiento no constituye una novedad, pues se ha venido refiriendo recurrentemente por voces autorizadas dentro y fuera de México.

La aportación de nuestro trabajo es la documentación de que el financiamiento y el presupuesto sí constituyen una seria limitación para resolver los problemas más acuciantes del envejecimiento de la infraestructura hidráulica. Una asignatura urgente es la construcción de infraestructura hidráulica más resiliente al clima, así como el mantenimiento adecuado de la infraestructura existente, como parte de enfoques más preventivos. El **capítulo 8** contiene las principales conclusiones, recomendaciones e impactos del proyecto. También se mencionan brevemente algunas avenidas de la investigación que valdría la pena avanzar.

Este trabajo representa en realidad un punto de partida para contar con más y mejores métricas de infraestructura hidráulica. Como lo subraya **Esfhani (2008)** en sus comentarios sobre el trabajo de **Estache (2008)**, ante los grandes retos implicados en las interconexiones alrededor de la infraestructura, la pregunta es *¿dónde comenzamos?* (énfasis añadido). Los capítulos 2 y 3 desarrollan esta pregunta en un marco analítico que orienta la investigación. Los resultados obtenidos en los capítulos subsecuentes son un inicio en esta travesía.

Anexo 1 Libros sobre agua en México y su contenido sobre infraestructura hidráulica y su envejecimiento, 2025 (noviembre)

Núm	Título	Autor(es) y año de publicación	Comentarios sobre contenidos
1	El recurso hídrico en México	CTMMA (2003)	El capítulo XI contiene una discusión analítica sobre los retos de entonces y futuros. Se subraya la exigencia de recursos para la nueva infraestructura y también para el mantenimiento de la existente. No se aborda el envejecimiento de la misma. También se señala que la recaudación es inferior a las necesidades.
2	Hacia una gestión integral del agua en México	Tortajada et al (2004)	Colección de ensayos sobre diferentes asuntos. En el capítulo introductorio se reconoce que, a pesar de su significancia, no hay suficientes inversiones en infraestructura hidráulica en un programa de largo plazo. No se aborda el tema del envejecimiento.
3	La Gestión del Agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable	Jacobo Villa y Saborio Fernández (2004)	Colección de 22 ensayos sobre temas y casos de estudio. No hay una contribución explícita sobre la infraestructura hidráulica y mucho menos sobre su envejecimiento. Si hay elementos de valor en varios capítulos. Se presenta uno sobre infraestructura hidroagrícola
4	La Gestión del Agua Urbana en México	Barking (2006) (Coord.)	Se presentan 15 capítulos sobre distintos temas y casos de estudio. Los referentes a Guadalajara, Hermosillo y Monterrey hacen referencia a la infraestructura hidráulica y su deterioro por la edad.
5	La Gestión del Agua en México	Comisión Nacional del Agua (2006)	Informe de los logros alcanzados durante los años 2000-2006. No se abordan explícitamente la infraestructura hidráulica y menos su envejecimiento. Referencia a los riesgos hidrometeorológicos extremos.
6	El agua en México	Guerrero García Rojas et al (2008) (Coords.)	Colección de ensayos sobre cuestiones de fondo. Sorprende, sin embargo, que el tema de la infraestructura hidráulica, no aparece como uno de los grandes retos. Si se menciona en el capítulo 1 que el agua es un factor limitante al crecimiento económico del país (Dinar et al, 2008)
7	El Agua Potable en México	Olivares y Sandoval /ANEAS (2008)	Colección de ensayos sobre diferentes cuestiones del agua en México. Solo hay un ensayo sobre la infraestructura hidráulica municipal y el endeble papel de los municipios y los organismos operadores para prestar servicios de calidad (Jardines Moreno, 2008).

Núm	Título	Autor(es) y año de publicación	Comentarios sobre contenidos
8	El Agua en México: Cauces y encauces	Jiménez et al (2010) (Coords.)	Colección de 24 capítulos sobre distintos temas del agua en México. Ninguno se centra explícitamente sobre infraestructura hidráulica. El capítulo 20 se centra sobre eventos extremos; se aborda el papel de la infraestructura.
9	Retos de la investigación del agua en México	Oswald Spring (2011) (Coord.)	Obra de referencia sobre el agua en el país, la cual incluye 60 capítulos en cinco partes. Sin embargo, no hay uno solo dedicado a la infraestructura hidráulica ni a su estado.
10	Crisis del Agua	Peña Ramírez (2012)	Se analizan los casos de Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey, sin abordar explícitamente la infraestructura hidráulica
11	Hacer posible la reforma de la gestión del agua en México	OCDE (2013)	Este es un libro de referencia. El capítulo 3 se centra sobre la mejora de la eficiencia económica y la sustentabilidad financiera. Se hace referencia al deterioro de la infraestructura y a las necesidades de su mayor financiamiento, aunque sin detallar su envejecimiento.
12	El agua en México	Fundación Friedrich Ebert (2017)	Colección de ensayos sin referencia explícita a infraestructura hidráulica
13	La crisis del agua y la metrópoli. Alternativas para la Zona Metropolitana del Valle de México	Perló Cohen y Castro-Reguera Mancera (2018)	Colección de textos de diversos autores abordando el reto de la transformación del sistema hidráulico. El capítulo introductorio contiene un rico análisis sobre libros publicados hasta entonces sobre la CDMX y el agua. En varias contribuciones si se aborda el tema de la infraestructura hidráulica de abastecimiento y drenaje, y su envejecimiento.
14	Apuntes sobre la Gestión Hídrica y la Infraestructura Hidráulica	Armenta y Collado (2019)	La sección 4.4 se centra, en términos muy generales, sobre la operación y el mantenimiento. El capítulo 9 se dedica a obras y acciones para 2019-2024.
15	Water Policy in Mexico	Guerrero García Rojas (ed) (2019)	Colección de ensayos sobre diferentes temas. El capítulo de Arias-Rojo y Salmón-Castelo tiene la pequeña sección 2.4.4 (pp. 40-43) sobre infraestructura hidráulica, con datos muy generales. También hay un capítulo sobre la infraestructura hidroagrícola. No se toca el asunto del envejecimiento.
16	Agua, el futuro ineludible	Graizbord y Arroyo Alejandro (2019)	Colección de casos de estudio – incluyendo a Monterrey y Guadalajara. En varios de ellos aparece el tema de la infraestructura hidráulica, aunque sin mucha profundidad. No se toca el tema de su envejecimiento.

Núm	Título	Autor(es) y año de publicación	Comentarios sobre contenidos
17	Agua para Monterrey	Aguilar Barajas y Ramírez Orozco, A. (2021)	Recuento detallado de la expansión metropolitana y la infraestructura hidráulica que la ha acompañado, desde principios de 1900 hasta finales de 2021. Si se presentan datos sobre el envejecimiento de la infraestructura.
18	Perspectivas del Agua en México	González Villarreal et al (2022)	Este es un documento con contenidos explícitos sobre infraestructura hidráulica. Además del análisis de los autores, se incluyen las reflexiones de un panel de expertos. Se subraya la necesidad de conocer el estado de la infraestructura, especialmente porque muchos de sus componentes ya han rebasado su vida útil. Se incluyen también los temas del mantenimiento y de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Se puntualiza la necesidad de incrementar los flujos financieros para la gestión del agua y la infraestructura, ya que se consideran como cuestiones estratégicas de seguridad nacional.
19	Agua y ciudades	Domínguez y López (2023)	Contribuciones temáticas y estudios de caso sobre diversas cuestiones del agua en ciudades mexicanas. No hay un contenido explícito sobre infraestructura hidráulica ni su envejecimiento
20	Perspectivas del Agua en el Valle de México	González Villarreal et al (2024)	Este es un trabajo de referencia sobre la problemática y soluciones en torno al agua en el Valle de México. El diagnóstico y las propuestas se enriquecieron con un taller de expertos, en el que participaron 24 personas provenientes de diferentes ámbitos de la comunidad. En la sección de propuestas hay un apartado para el financiamiento y otro para la infraestructura. Se subraya que las elevadas pérdidas físicas se deben principalmente a la falta de mantenimiento y reposición de las estructuras de conducción y distribución, lo cual tiene un impacto directo en el acceso a servicios de agua potable y saneamiento (p. 75). En las conclusiones se plantea la pregunta de fondo: “Y ahora...qué hacemos y por dónde comenzamos” (p. 90)

Fuente: Elaboración propia

2

Revisión de la Literatura

La infraestructura en general y la hidráulica en particular son esenciales para el desarrollo económico y social; de aquí la fundamental relevancia de prestarle atención a su envejecimiento. Es claro que una infraestructura deteriorada va a brindar servicios de mala calidad cuyos impactos se van a propagar en *cascada* a otros subsistemas o a otras infraestructuras. En este sentido es de gran valía el concepto de infraestructura integrada o interdependiente, dentro de enfoques sistémicos. Es decir, se trata de analizar la infraestructura hidráulica – y sus relaciones con otras infraestructuras – como parte de un sistema unificado. En la literatura también se le reconoce como sistemas de infraestructura.

Como bien lo expresara desde hace más de 20 años el informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo sobre la medición del desarrollo sostenible (**OECD, 2000**), la búsqueda de información y datos deben partir de marcos de análisis. Es decir, para qué se quieren los datos. En este sentido, los datos seleccionados deberían estar en función del marco analítico construido exprofeso, además de que necesitan ser interpretados en contexto. Es por ello que, en este capítulo, antes de pasar propiamente a los modelos y métricas sobre la edad y el envejecimiento de la infraestructura, se le dedicó atención a este importante asunto.

Se encuentra que lo que aquí se refiere como el *factor de envejecimiento* - expresado como la edad de servicio en relación con la vida útil de diseño - es un buen indicador para analizar la relativa obsolescencia de la infraestructura. Desde las métricas más sencillas hasta los modelos más complejos tienen a **la edad** de la infraestructura **como variable clave**. Se reconoce, por supuesto, las complejidades detrás del proceso de envejecimiento y de la naturaleza multifactorial de estas dos variables. Los conceptos de fin de vida útil funcional y técnica ilustran muy bien lo anterior. El tema del mantenimiento es muy relevante pues puede retrasar o adelantar este proceso. Estos modelos más complejos son útiles para

optimizar la decisión de cuándo rehabilitar o reemplazar activos de infraestructura, solo que requieren de información que actualmente no está disponible en México.

Esta revisión de la literatura es clara en señalar la relación entre infraestructura envejecida y las fugas, así como el reconocimiento de que la desatención de estas va a significar presiones sobre la oferta de agua. Esto significa que la gestión del agua urbana tiene que considerar la oferta y la demanda en conjunto. Para México este tema es y debe ser de la mayor relevancia.

2.1 Cuestiones de fondo sobre la infraestructura hidráulica que envejece

2.1.1 Sistemas de infraestructura

La planeación de la infraestructura hidráulica se entiende mejor desde una perspectiva sistémica. Si bien se puede considerar que los distintos sistemas de infraestructura – presas, acueductos, redes de distribución, y plantas de tratamiento, por ejemplo - desempeñan diferentes funciones, también se tiene que reconocer su interconexión. Lo anterior significa el abordaje de variados retos para reconocer y manejar las complejas interdependencias de un sistema más amplio o de un sistema de sistemas que involucra diferentes escalas e incertidumbres en el tiempo y el espacio (**Ganguly et al, 2021; Karamouz, 2022; Grieg, 2023**). Este enfoque de **infraestructura integrada** es muy útil para comprender que la falla en un sistema derivado del envejecimiento u obsolescencia de la infraestructura va a tener *efectos cascada* en otros sistemas. Se sostiene que la magnitud de los impactos y frecuencia de estas interdependencias deberían considerarse en el ciclo de vida de los sistemas: (1) planeación, (2) diseño, (3) construcción, (4) operación, (5) monitoreo, (6) mantenimiento, (7) fin de servicio y reemplazo (**Minaei et al, 2023**).

Fallas en cascada de sistemas de infraestructura interdependiente

Literatura relativamente reciente está subrayando la necesidad de prestar atención estas fallas en cascada de sistemas de infraestructura interdependientes (**Minaei et al, 2023**). Los casos de la energía eléctrica y las vialidades son ejemplos de estas interconexiones. La energía es necesaria para bombear el agua. Fallas en estas entregas pueden dejar a grandes partes de las ciudades sin agua. México tiene variados ejemplos de ello.¹ Estas fallas no solo se refieren a la infraestructura de conducción de las presas – por falta de energía - a las ciudades sino también a las redes de distribución urbanas avejentadas. Por supuesto, las propias fallas en los acueductos que envejecen van a significar menos volúmenes disponibles para las ciudades.

Por otra parte, las inundaciones o fugas en la red de distribución afectan el pavimento y, en consecuencia, la movilidad, impactando con ello el bienestar de la población y la economía urbana. Es decir, las fugas en las avenidas de las ciudades afectan adversamente la

¹ El 14 de junio de 2025 varias colonias de Monterrey se quedaron sin agua debido a fallas en el suministro de la energía eléctrica para bombear el agua.

movilidad, con consecuencias económicas y de funcionalidad urbana. Si bien difíciles de estimar, se presume que lo anterior puede representar pérdidas muy considerables. La escala espacial o de influencia de esta infraestructura interdependiente es distinta según los sistemas involucrados. En metrópolis como Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara, dada su contribución a la economía del país, las afectaciones de estas fallas en cascada pueden ser de significancia nacional.

Más específicamente, una consecuencia directa del deterioro de la infraestructura hidráulica son los impactos adversos en las actividades económicas y, por supuesto, en los consumidores. Esto lo muestra un estudio reciente para el Reino Unido, en el cual se evalúa el impacto de las fugas y pérdidas en la red de distribución, tal como lo experimentan los usuarios finales (**Orime et al, 2024**). Los autores construyen dos índices de desempeño orientados a la satisfacción de los consumidores, basados en la confiabilidad de la red y la severidad en los déficits de presión. Estos índices relacionan una mala experiencia de los consumidores con un bajo desempeño del sistema de distribución debido al deterioro de las tuberías. Lo anterior también permite la identificación de dónde están los principales defectos en la red para su atención, y reducir estos efectos en cascada. La gestión de activos ayuda a incorporar esta perspectiva más comprensiva para atender los sistemas de infraestructura que envejecen.

Gestión de activos e infraestructura multi-integrada

Con el tiempo la infraestructura envejece y eventualmente se deteriora, por lo que se requiere la administración de sus activos de forma estratégica y sistemática. Independientemente del contexto en el que se use la frase, la gestión de activos se refiere a la combinación de administración, finanzas, economía, ingeniería y otras prácticas aplicadas a los activos físicos para maximizar el valor de su reserva en el ciclo de vida (**Daulat et al, 2024**). Lo anterior está pensado para proporcionar un buen servicio a los consumidores, comunidades y el ambiente a un nivel aceptable de riesgo (**Marlow et al, 2010**). En este sentido, se presentan muchos retos. Ejemplos de ello son el **envejecimiento de los activos y las restricciones presupuestales para su mantenimiento**. (nuestro énfasis)

No es gratuito subrayar que los sistemas de infraestructura lineal (calles, agua/drenaje/líneas de energía) están correlacionados; la intervención en un sistema puede afectar la prestación del servicio en otro (**Marzouk & Osama, 2017**). No es efectivo ni eficiente considerar, por lo tanto, una sola infraestructura. Esta ineficiencia se puede observar directamente cuando se calculan los gastos asociados con trabajos rutinarios, excavaciones y rellenos, así como indirectamente al considerar los costos asociados con las interrupciones, demoras tanto de tráfico como debido a los trabajos de rehabilitación (**Abu-Samra et al., 2020**). Teóricamente, al colaborar con otras entidades, una agencia puede evitar tareas repetitivas y, por lo tanto, dividirse los costos. El concepto de gestión de activos de multi-infraestructura integrada (IMAM, por sus siglas en inglés) se basa sobre el tomar ventaja de estas sinergias (**Daulat et al, 2022**).

Es por todo lo anterior que el análisis, diseño, y planeación de la infraestructura requiere de un marco sistémico. Esta planeación, a su vez, necesita de sistemas de gobernanza más robustos para abordar los retos de las interconexiones involucradas. Dada la naturaleza multi dimensional y jurisdiccional de las mismas, la coordinación interinstitucional es indispensable (**Ganguly et al, 2021**).

2.1.2 El proceso de envejecimiento y obsolescencia de la infraestructura

Cada infraestructura tiene una vida de diseño por lo que el envejecimiento es un proceso normal. Esto se aplica, por ejemplo, a las presas de almacenamiento de agua de cualquier tamaño. El envejecimiento puede ser definido como un proceso de deterioro que ocurre cinco años después del principio de la fase de operación, de tal forma que el deterioro que ocurre antes de este tiempo se atribuye a un diseño, construcción u operación inadecuada (**Zamarrón-Mieza et al., 2017**).

De acuerdo con **Wan-Wendner (2018)** una edad arbitraria se usa hasta el punto cuando, expresado literalmente, una construcción humana, gran estructura de concreto empezaría muy probablemente a expresar signos de envejecimiento. Estos signos pueden incluir casos crecientes de fallas en la presa, costos crecientemente progresivos de reparación y mantenimiento, sedimentación creciente del reservorio, y una pérdida de la funcionalidad y efectividad de la presa. El envejecimiento también incrementa la vulnerabilidad de una presa al clima cambiante debido a la exposición a inundaciones más frecuentes y extremas, y/o a la creciente evaporación de un embalse que puede acelerar la pérdida de su función.

Estas manifestaciones están fuertemente interconectadas. Por lo tanto, la edad *per se* no es una variable decisiva para la acción (**Perera et al, 2021**). Por ejemplo, dos presas construidas el mismo año pueden tener un estado actual muy diferente y una vida efectiva también distinta, con base en sus respectivos parámetros y contextos. **Aun así, la edad es la métrica macro más simple por medio de la cual las presas pueden ser caracterizadas y comparadas** (nuestro énfasis), en el contexto de su efectividad disminuida, los riesgos crecientes y los impactos para la economía y el ambiente. Este hallazgo es de una gran relevancia para este proyecto y se retoma en la parte correspondiente precisamente a métricas para evaluar la calidad de infraestructura.

El envejecimiento de la infraestructura representa riesgos crecientes a la seguridad pública. Esto lo muestran **Perera et al (2021, p.13)** para las presas. Aún si estructuralmente están bien, las presas, y grandes presas en particular, se consideran de alto riesgo ante la potencial pérdida de vidas debido a las consecuencias de su falla. Las fallas son generalmente el resultado de un pobre diseño o construcción, falta de mantenimiento o una inadecuada gestión (**FEMA, 2019**; <https://damsafety.org/dam-failures>).

En el balance, como ya se ha señalado, no todas las fallas de las infraestructuras se pueden atribuir al envejecimiento, sin más datos detallados. Sin embargo, en el caso de las presas, por ejemplo, los causantes de las fallas (como errores estructurales, inundaciones extremas, deslizamientos, erosión interna y mala operación) son más comunes en las más viejas, debido a que su envejecimiento incrementa su vulnerabilidad a estos detonadores. Como

se indica textualmente, el cambio climático, expresado, por ejemplo, en inundaciones más severas, puede acelerar el proceso de envejecimiento de una presa. La creciente frecuencia y severidad de estos eventos pueden disminuir la seguridad que fue diseñada para una situación climática distinta.

Se entiende entonces que el envejecimiento y obsolescencia de la infraestructura se puede deber a múltiples factores y que se trata de procesos complejos. Por ejemplo, **Collins y Blin (2019)**, encuentran seis mecanismos de envejecimiento de los materiales y sus elementos. Estos mecanismos van desde interacciones físicas, a la degradación estructural y elementos electroquímicos. En total, se consideran poco menos de 70 elementos. La relación de mecanismos y elementos – indicados en paréntesis (p. 23):

- 1 Interacciones físicas (14)
- 2 Biológicos (8)
- 3 Degradación estructural (7)
- 4 Químicos (14)
- 5 Mecánicos (13)
- 6 Electroquímicos (10)

Este conocimiento presenta variadas e importantes implicaciones de política pública. Por ejemplo, la confiabilidad de la infraestructura puede gestionarse con diferentes opciones de intervención. La infraestructura mejorada impulsa la economía a través de una gestión más eficiente, una construcción más duradera y un **mantenimiento proactivo (Collins y Blin, 2019, p. 135)**. Un enfoque proactivo, se traduce en menores interrupciones de los servicios. Este es un efecto muy visible en el funcionamiento de la infraestructura, con consecuencias muy negativas en la economía y bienestar social, pero el cual está subestudiado. Ciertamente esto pasa en el caso de México.

Es decir, ¿cuál es el costo económico financiero de las interrupciones en los servicios de agua derivados de una infraestructura envejecida u obsoleta a la que no se le da el suficiente mantenimiento? Dada su naturaleza transversal, varios asuntos sobre este proceso de envejecimiento se vuelven a tocar en otras secciones, como en la 2.1.3 (al abordar los temas del envejecimiento de las presas y la 2.1.5 (al referirse a la rehabilitación y/o reemplazo de sistemas de distribución). En lo que sigue se enfatiza un poco más el envejecimiento de estructuras multifuncionales.

La multifuncionalidad significa que las estructuras hidráulicas son de diferentes tipos, pueden servir diferentes funciones y son diseñadas para satisfacer diferentes requerimientos de funcionalidad y desempeño (**Bernardini et al, 2014**). Además, ellas comprenden diferentes componentes estructurales – la estructura civil, componentes de acero, sistemas operativos y de control, electromecánicos y electrohidráulicos. Otros elementos de esta multifuncionalidad son los siguientes (p. 2):

- Las estructuras hidráulicas pueden alcanzar el final de su vida útil si ya no son económicamente mantenibles o no cumplen con sus requerimientos funcionales, en el tiempo presente o el futuro.
- La necesidad del reemplazo puede ocurrir por el grave deterioro de la infraestructura y el mal funcionamiento, o debido al cambio en las demandas, como resultado de cambio climático o del desarrollo social.

- Cambios en el ambiente físico y socioeconómico influyen en la necesidad y el tiempo del reemplazo.
- Las demandas de funciones requeridas y de desempeño para la nueva estructura pueden diferir de la estructura original.
- Esto mantiene importantes implicaciones para el rediseño de la infraestructura existente, ya que el reemplazo de “una a una” de la infraestructura puede no ser la mejor opción.

2.1.3 Envejecimiento de infraestructura de almacenamiento

El envejecimiento de la infraestructura de almacenamiento de agua se está convirtiendo en un riesgo emergente global (**Perera et al, 2021**).² Las presas ilustran que se está experimentando un envejecimiento masivo de la infraestructura de almacenamiento. En promedio la esperanza de vida de una presa es de 50 años. La vida de servicio de presas bien mantenidas y monitoreadas bien pueden alcanzar los 100 años, mientras que algunos elementos (compuertas, motores) podrían necesitar ser reemplazados después de 30 a 50 años.

De acuerdo con **Perera et al (2021)**, decenas de miles de presas han alcanzado el límite o umbral de edad “alerta” de 50 años, y muchas otras alcanzarán los 100 años. En Japón y el Reino Unido la edad promedio de las grandes presas es de 100 años (p. 7). En el caso de América del Norte, en casi todas las categorías funcionales el promedio de edad de las grandes presas excede los 50 años (p. 12). Un análisis de las presas en Estados Unidos sugiere que el 75% de las fallas ocurren después de los 75 años de edad (<https://damsafety.org/incidents>). No obstante, la mayoría de las fallas en las presas chinas ocurren durante los primeros años de uso.

Literalmente se expresa que estas estructuras avejentadas se relacionan con necesidades y costos de mantenimiento crecientes, al mismo tiempo que disminuyen su efectividad y se convierten en una amenaza para la seguridad humana y el ambiente (p. 4). Se concluye que se tiene un riesgo hídrico emergente. En síntesis, no obstante que el envejecimiento de las presas emerge gradualmente como una cuestión para el desarrollo de muchos países, no se le ha dado una valoración comprensiva ni tomada en cuenta en la planeación futura de la infraestructura de almacenamiento de agua (p. 6). Esto se muestra muy bien con la muy limitada atención al mantenimiento de la infraestructura en general y de presas en particular. Bien lo señalan **Frangopol y Tsompanakis (2024)**: El mantenimiento de la infraestructura que envejece es una cuestión de seguridad.

Mantenimiento de la infraestructura (de presas)

El envejecimiento de la infraestructura aumenta sustancialmente las necesidades de su mantenimiento, por lo que contar con seguridad y funcionamiento adecuados requiere de inversiones crecientes (**Perera et al, 2021**). La práctica internacional indica que el mantenimiento y reparación de las presas necesitan inspecciones y reparaciones regulares

² Mucho de esta subsección se apoya en Perera et al (2021).

las cuales pueden incrementar los costos operativos por la edad de los 25-35 años. Esto muestra que la mayoría de las fallas de las presas se podrían haber prevenido si estas hubieran tenido un mantenimiento e inspecciones adecuadas. Es decir, invertir en mantenimiento es, a la larga, una decisión que aporta muchos beneficios.

En el caso de las presas, los costos de exploración son indispensables para determinar la viabilidad ingenieril, económica, social y ambiental de los proyectos (**Vázquez Contreras et al, 2012**). Estos costos pueden ser muy elevados (por la complejidad y duración de varios años), pero su significancia es vital para la selección de los sitios y el adecuado funcionamiento de estas obras. A menudo, una selección y diseños deficientes puede traducirse en funcionamientos inadecuados, en mayores costos de mantenimiento y en una reducción de la vida útil. Se enfatiza pues la fundamental relevancia del *diseño inicial*.

Sedimentación

La literatura y práctica muestra que la sedimentación le resta funcionalidad a las presas (**Perera et al, 2021, p. 9**). La sedimentación es crítica para la esperanza de vida de una presa; es decir, puede acelerar el fin de su vida útil. Al acumular sedimentos, es claro que la capacidad de almacenamiento disminuye. Atender esta cuestión representa costos de mantenimiento muy elevados. Este fenómeno también exige un muy alto conocimiento, no siempre disponible, sobre el proceso mismo de sedimentación. Es necesario contar con una perspectiva territorialmente más amplia para a nivel de cuenca hidrológica y sus componentes tener, por ejemplo, información sobre la cantidad y tipos de escurrimientos que llegan a las presas. El tipo de urbanización en las partes altas va a afectar los escurrimientos. El ambiente natural juega un papel muy importante para entender el proceso de sedimentación y, en general, el funcionamiento de los embalses. Como lo argumentan estos autores y que es ampliamente aceptado en la literatura nacional e internacional. El “nuevo” ecosistema post-presa no será necesariamente el mismo que el pre-presa (p. 9).

Presas – El caso de la India

El caso de la India es particularmente relevante al analizar el tema de las presas y su envejecimiento. Para **Harsha (2019)** el envejecimiento de sus grandes presas es el lado oscuro de las políticas hídricas del país. Para 2050 más de 4 mil de ellas alcanzarán un mínimo de 50 años, pavimentando el camino a una futura crisis de agua.³ Esta crisis y los daños intersectoriales en cascada se subestiman en las actuales políticas y planes de acción. Más puntalmente, se debería de revisar la capacidad utilizable de agua superficial, deduciendo la capacidad de almacenamiento de aquellas presas cuya vida de servicio se ha terminado.

³ Para 2050 se notará claramente el envejecimiento de las grandes presas del país (p. 38): 4.264 tendrán al menos 50 años; 64 de ellas tendrán 150 años; 302 habrán completado un mínimo de 100 años; y 3,880 tendrán entre 50 y 100 años.

Con el envejecimiento de las presas también viene su vulnerabilidad estructural.⁴ El caso de la India muestra que las presas construidas más recientemente – ante normas más estrictas y procesos (y materiales de construcción) superiores, presentan mayores condiciones de durabilidad. También se reconoce que la construcción de estas presas ocurre en entornos regionales muy diferentes: agro climas, geomorfología, cobertura vegetal. Por lo tanto, la sedimentación varía de presa en presa, razón por la cual se dificulta enormemente su estimación y atención. Esto significa que se subestima la sedimentación y, por lo tanto, se sobreestima la capacidad de almacenamiento.

2.1.4 Mantenimiento, rehabilitación y renovación de infraestructura

La decisión de mantener, rehabilitar y/o reemplazar activos es una decisión difícil pues involucra mucha información que a menudo no está disponible, especialmente en países de menor desarrollo relativo, para construir modelos que ayuden a optimizar la decisión. Además, por supuesto, se requieren grandes recursos financieros los cuales tampoco están disponibles en la mayoría de los países. En este contexto, la optimización de las decisiones involucradas se vuelve un imperativo.

En la práctica muchas de estas decisiones se basan en la experiencia de los tomadores de decisiones, principalmente frente a los muy limitados recursos financieros. Este tema sobre la valía de la experiencia de abordar con un poco más de detalle en la sección 2.2.6. Lo que se termina haciendo es el mantenimiento, rehabilitación y en menor medida renovación de solo pequeñas partes de los sistemas de infraestructura de agua de las ciudades. Lo anterior se hace en función del presupuesto anual, cuyos tiempos de liberación y ejecución, además, no corren a la par de la urgencia para realizar las obras. Esta situación se entiende aunque es también claro que, como lo muestra la literatura y práctica nacional e internacional, se incurre en decisiones subóptimas. En lo que sigue se abordan retos y asuntos clave en torno a la rehabilitación de sistemas de infraestructura y de distribución.

Las restricciones económico-financieras ameritan ser propiamente consideradas y abordadas. Dada la larga vida de las obras de infraestructura, los costos de operación y mantenimiento (O&M) pueden ser muy grandes. Los problemas derivados de recursos insuficientes para estos rubros generalmente son consecuencias de un diseño insuficiente. Como lo expresa textualmente **Albarrán Núñez (2021, p. 21)**: “... el enfoque del proyecto, desde su concepción, debe tener una absoluta claridad sobre su operación, mantenimiento y confiabilidad”.

Esto es lo que se conoce en la literatura como **diseño inicial** o *hacer las cosas bien desde un principio* (**Winston, 1994**). Lo anterior debe llevarse a cabo como una filosofía de trabajo; no hacerlo así significa que, al final del día, la O&M de los proyectos tendrá lugar “como mejor se le ocurra” al operador de la infraestructura (p. 22). Como lo argumenta **Jiménez**

⁴ Una estructura de almacenamiento se va a debilitar con el tiempo. Particularmente, la corrosión del acero reforzado es la principal causa del deterioro del concreto. Claro, un tema a considerar es que las presas se construyen con diferentes normas, procesos y materiales de construcción. La erosión y la sedimentación ocurren en distintas condiciones y velocidades. En suma, el diferencial generacional en la construcción de las presas, puede ser un factor de incluso mayor peso que el envejecimiento mismo.

Alcazar (2022, p. 8), la mala planeación tiene sobrecostos. También se tienen demoras en los plazos de ejecución (Miranda, 2022). Para este autor, la planeación deficiente de la infraestructura se hace muy visible en el ámbito urbano.

Es debido a que, a la par de la construcción de nueva infraestructura, está la imperiosa necesidad de atender apropiadamente la operación y el mantenimiento **oportuno** de la infraestructura (nuestro énfasis) (**Rodríguez Tirado, 2021**). Para este autor, esta incorporación de la O&M en el proceso de planeación, es esencial para lo que llama **operación sostenible de la infraestructura** a lo largo de su vida útil. Atender en políticas públicas las actividades que la conforman afectan favorablemente el funcionamiento eficiente, confiable y seguro de la infraestructura. No hacerlo con frecuencia se ha traducido en sobre costos o fallas con graves consecuencias para la población y la economía. A menudo se trata de la pérdida de la infraestructura misma. México tiene una amplia variedad de ejemplos en este sentido.

La ausencia o insuficiencia, como ya se mencionó, de mantenimiento preventivo y correctivo de esta infraestructura - asociada con financiamiento inadecuado – se va a reflejar en fallas y fugas en el suministro de agua potable, así como en deficiencias en la red pública de drenaje, el mal funcionamiento de los pozos, y en el abandono de plantas de tratamiento (ante la ausencia o insuficiencia de recursos). Abordar esta situación requiere, entre otras medidas, de incrementar los precios del agua a niveles que mejor reflejen los costos de la prestación del servicio, incluyendo, como ya se ha expresado, la operación y el mantenimiento de la infraestructura. Como bien lo sintetiza la presentación del número 657 de la revista *Ingeniería Civil*, de octubre 2024, al referirse a la infraestructura: *Es mucho más que construir*. Se trata de considerar un “mantenimiento constante y eficiente para garantizar el mayor plazo de vida útil para cada obra de infraestructura” (p. 3)

Los elementos para esta sostenibilidad, la cual también pasa, al final del día, por la dimensión económica-financiera, son los siguientes:

- Monitoreo
- Conservación
- Mantenimiento
- Reparación
- Rehabilitación
- Modernización y automatización
- Reemplazo programado

2.1.5 Rehabilitación y/o reemplazo de sistemas de distribución

En función del mantenimiento que se le brinde y del proceso normal de envejecimiento, la infraestructura en general y de agua en ciudades en particular necesitará ser rehabilitada y/o reemplazada. Hace poco menos de 20 años, **Juuti et al (2007)** advertían de los retos futuros en los servicios de agua, de saneamiento y de salud ambiental, subrayando el tema del envejecimiento de la infraestructura urbana. Se entiende que las barreras para actualizar esta infraestructura se encuentran en **jurisdicciones** locales, nacionales e internacionales

(Nuestro énfasis). Como lo expresan textualmente, además de nuevas inversiones, muchas ciudades en el mundo necesitan **reparar y reemplazar infraestructura obsoleta** (nuestro énfasis).

Frente a este contexto, como ya se ha señalado, generalmente los operadores de agua administran y operan los sistemas de distribución en un modo reactivo, para responder a una emergencia de fugas o rupturas en las tuberías (**Selvakumar y Tafuri, 2012**).⁵ El principal factor que orilla a los organismos de agua a trabajos de rehabilitación de su infraestructura subterránea son los costos directos e indirectos asociados con las fallas acumulativas en las tuberías (**EPA, 2009**).

El caso de la rehabilitación

Desde hace varios años se tiene conocimiento sobre qué factores orientan la rehabilitación de los sistemas de distribución (**Selvakumar y Tafuri (2012)**). Por supuesto, el entorno cambiante obliga a la actualización permanente de este conocimiento. Es entendible que el cambio climático impone ya y lo hará más en el futuro, nuevas condiciones y retos. Con estrategias bien desarrolladas para reparar las tuberías en emergencias, los organismos de agua encuentran que la opción de reparar es más barata.

Más específicamente, estos autores proporcionan elementos clave para ayudar a entender las tareas de rehabilitación de la infraestructura de distribución.⁶ Los sistemas rehabilitados pueden ser mejorados para proporcionar condiciones hidráulicas e integridad estructural incluso mejor que la tubería original. **Las técnicas de reparación** se usan cuando la tubería original está bien, proporciona una capacidad de flujo aceptable y puede servir de soporte o apoyo para el método de reparación. Cuando la tubería existente está severamente deteriorada, colapsada o se necesita mayor capacidad de flujo, **usualmente se reemplaza**.

En la rehabilitación, la tubería existente se usa como parte de la renovación. Los métodos actuales de renovación generalmente abordan condiciones estructurales inadecuadas o fugas en la tubería. La incertidumbre en la apropiada selección de técnicas de reparación y reemplazo está parcialmente relacionada con la falta de entendimiento sobre las capacidades y costos asociados con cada metodología. Se subraya que es crucial contar con datos sobre la efectividad y envejecimiento de las tecnologías de rehabilitación y materiales, así como la información sobre el costo del ciclo de vida. Lo anterior se requiere para determinar si la rehabilitación o el reemplazo es más costo-efectivo (**Selvakumar y Tafuri, 2012**).

Rehabilitación versus la decisión de reemplazo

La decisión de mantener, rehabilitar o reemplazar infraestructura es compleja. El caso más particular de la rehabilitación frente al reemplazo lo ilustra bien. Hace poco más de 45 años

⁵ Lo que sigue se apoya textualmente sobre estos autores (p. 205). Aquí también el énfasis es propio.

⁶ La sección que sigue se apoya en la introducción de estos autores (p. 202). El énfasis (negritas) son propios.

Shamir & Howard, 1979 lo indicaban así, textualmente: La decisión de reemplazar o no una tubería en un tiempo en particular a menudo se hace con la evaluación de dos alternativas: (1) reemplazar una tubería, incurriendo en los costos de reemplazo y los costos futuros asociados con la nueva línea; o (2) retener la tubería existente, ahorrar los costos de reemplazo, pero incurriendo en los costos crecientes de reparación, la interrupción en el servicio y los daños. También se indicaba que las circunstancias que afectan la planeación y priorización de la rehabilitación incluyen las actuales condiciones del sistema, el estado de las necesidades críticas a reparar, el financiamiento del trabajo de rehabilitación, y la habilidad para inspeccionar y valorar las condiciones y deterioro de cada elemento del sistema (**Selvakumar y Tafuri, 2012, p. 207**).

Estos autores sostienen que la valoración de las condiciones de las tuberías de agua es difícil. Más específicamente, se encuentra que (p. 208):

- El uso de análisis de condiciones varía mucho entre los organismos de agua.
- La inspección efectiva y el análisis de condiciones de las tuberías de agua es generalmente difícil o extremadamente costoso para llevarse a cabo.
- El análisis de condiciones es vital en la selección de opciones de rehabilitación viables. Este análisis debería identificar si existe la capacidad, calidad del agua (corrosión interna) o problemas estructurales.

2.1.6 Agua no contabilizada y fugas

El agua no contabilizada (ANC) emerge como uno de los temas más cruciales para la gestión del agua. El ANC es muy transversal, toca muchas dimensiones de esta gestión. Su entendimiento, sin embargo, representa áreas de oportunidad. Abordarlas es muy importante pues de otra forma habrá información incompleta o con poca claridad, empezando por su definición. Lo anterior puede conducir a implicaciones de política equivocadas o incompletas. Un ejemplo de esto lo constituyen las fugas. Estas son un componente del agua no contabilizada, a las que se suman otros rubros tales como errores de macro y micro medición, consumo clandestino y, en ocasiones, ‘otros’.

El apropiado entendimiento del ANC y de las posibilidades de su reducción, es un insumo muy importante para una buena toma de decisiones. Dicho de otra forma, tener *mejores contabilidades* del agua que entra, se distribuye y consume en los sistemas hidráulicos urbano-regionales tendría que ser un requisito obligado de la buena gestión del agua. Como se muestra más adelante con el caso de Bergen, Noruega, reducir el ANC (las fugas incluidas, por supuesto) le pone menos presión a la oferta de más agua, a menudo de fuentes muy distantes y costosas.

Como lo sostienen **Godfrey y Chalmers (2012, p. 13)** para el caso de la contabilidad del agua (*water accounting*):

“...La contabilidad del agua ha crecido de ser una demanda por información a brindar rendición de cuentas y apoyar la toma de decisiones. Es importante reconocer que por separado la contabilidad del agua no resolverá ninguna crisis. Sin embargo, sí puede jugar una parte vital en la resolución de asuntos económicos, ambientales y sociales, entre otros.

Después de todo, las buenas decisiones son generalmente soportadas por buena información”

Es común, por lo menos en el contexto de México, confundir las fugas con el agua no contabilizada. Al hacerlo se sobredimensiona el problema y no se toma nota de las otras causas. Por ejemplo, datos de 2017 para el Área Metropolitana de Monterrey estimaban el ANC en 31.7% y las fugas en 6%. Al margen de la veracidad de las cifras, es claro que la confusión mencionada lleva a implicaciones incorrectas. Por supuesto, las fugas representan una asignatura que atender pues como se indica en la literatura, sus impactos van más allá de las pérdidas físicas y financieras para los organismos de agua. En el contexto de este proyecto de investigación, las fugas son la expresión más visible del deterioro y envejecimiento de la infraestructura. Por tal razón, y ante su impacto en la sostenibilidad de los servicios de agua, se subraya aquí esta significancia.

La relevancia de atender las fugas en la gestión del agua se reconoce bien en México. Si bien no es la única variable, hay un amplio consenso en que la edad de la infraestructura – como en el caso de las tuberías de agua potable – se asocia con un mal funcionamiento de la misma, lo que termina generando un mal servicio. Por ejemplo, las fugas dependen de la presión del agua en las tuberías, pero también de la edad de las mismas (**Robledo Cabello, 2021**).

Agua que no genera ingresos

Es común encontrar en la literatura internacional el concepto de agua que no genera ingresos. En inglés esto es lo que se conoce como *non-revenue water* (NRW). Si bien NRW guarda similitudes con el ANC, estrictamente no significan lo mismo. El concepto de NRW, al igual que el de ANC, se presta a confusiones. También se le menciona como agua no facturada o agua perdida. La confusión más grande es considerar a las fugas – que es un componente tanto del ANC como del NRW – como sinónimo de estos dos conceptos.

Por ejemplo, para **AbuEltayef et al (2023)** el NRW se define como la diferencia entre la cantidad de agua producida y el agua consumida. Esta definición guarda parecido con lo que se conoce como agua no contabilizada. También se define como la diferencia entre la cantidad de agua suministrada en el sistema de distribución y la cantidad de agua que se recauda de los consumidores. Lo anterior se acerca más a la definición dada por una traducción literal del inglés, al referirse a agua que no genera un ingreso al organismo. Las implicaciones de lo anterior en la adecuada provisión de los servicios son muy profundas.

Tener altos o bajos niveles de ANC o NRW se asocia con un mosaico multifactorial de enorme complejidad. Si los niveles son altos, habrá problemas para la gestión operativa de la organización (cantidades de agua sin medición por un medidor, fugas y uso ilegal, además de grandes volúmenes que no se facturan, o su combinación. La falta de recursos financieros limita la habilidad de los organismos de agua para invertir en la mejoría de la

infraestructura hidráulica, su reparación y expansión. NRW es particularmente problemática en áreas urbanas con alto crecimiento e **infraestructura envejecida**, lo que se traduce en interrupciones en el servicio. Al final, se afecta la sostenibilidad del sistema urbano (**Molinos Senante, 2018**). Las pérdidas de agua no solo son de un recurso vital sino también de energía utilizada en todo el ciclo hidrológico urbano del agua (bombear y tratar) lo que resulta en crecientes emisiones de carbono e impactos ambientales

Papel de las fugas

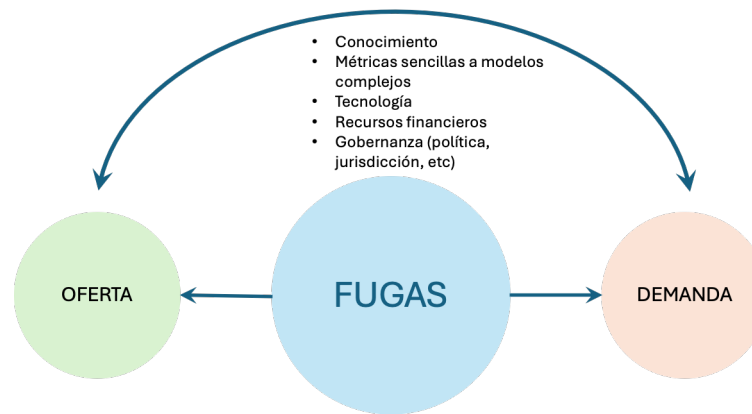
Independientemente de si se trata del ANC o del NRW se ha mostrado que las fugas ocupan un papel de enorme trascendencia. En la práctica su reducción significa una forma de aumentar la oferta de agua. Como ya se ha señalado, el envejecimiento de la infraestructura y la falta de inversiones en mantenimiento y su mejoría conducen a un deterioro en los sistemas de distribución. Lo anterior presenta grandes retos para la seguridad y sostenibilidad hídrica (**Beygi & vsn Zyl, 2024**). Aún en países más industrializados las pérdidas de agua por fugas son significativas. En Estados Unidos, las ciudades más viejas tienen infraestructura más avejentada; se estima que se pierde un 14-18% del agua suministrada. En el Reino Unido, en Inglaterra y Gales el 23% del agua es considerada como *non-revenue water*. En Nueva Zelanda, 21% del agua se pierde en fugas. Si el volumen global de NRW se redujera un tercio, el agua ahorrada debería ser suficiente para aproximadamente 800 millones de personas, suponiendo 150 litros *per capita* (**Reddy, 2021**).

Un asunto que vale la pena ser subrayado es que a menos que se reduzcan las fugas, la presión sobre la oferta de agua se va a incrementar. En términos prácticos, la reducción de fugas constituye un incremento en el volumen de almacenamiento en las presas (**Kristvik et al (2019)**). Se reconoce que hay factores externos que afectan la vulnerabilidad del sistema de suministro – como el cambio climático y el crecimiento poblacional – aunque este sistema también puede responder a cambios que los tomadores de decisiones si pueden controlar, al menos parcialmente– como el manejo de las fugas (lado de la demanda) y la capacidad de almacenamiento (por el lado de la oferta).

Si se entiende que, al final del día, reducir las fugas significa más disponibilidad de agua, también se comprende que efectivamente en la gestión del agua oferta y demanda se tienen que analizar en conjunto. En la sección 2.2.6 se presenta el caso de Bergen, Noruega (**Kristvik et al., 2019**), en el cual se muestra que reducir las fugas a un nivel de 20% para 2024 (del entonces existente 31%) tendría aproximadamente el mismo efecto que un incremento del 10% en el suministro. La Ecuación 2.1 indica claramente la importancia de la interrelación entre fugas y suministro y la **Figura 2.1** muestra esta interrelación y parte del entorno sistémico sobre esta cuestión.

$$\text{Porcentaje de fugas en relación con el suministro (\%)} = \frac{\text{Volumen de fugas (m}^3\text{)}}{\text{Volumen suministrado (m}^3\text{)}} \quad (2.1)$$

Figura 2.1 Gestión de fugas como un sistema combinado de oferta y demanda



Fuente: Elaboración propia

2.1.7 Manejo de agua de lluvia, drenaje pluvial y gestión de inundaciones

El drenaje urbano es un gran reto para la gestión de la infraestructura urbana. Su conjunción con el agua de lluvia magnifica los problemas a abordar. Según **Furtado et al (2022)** La regulación de aguas pluviales es una cuestión de desempeño no de opción, para enfrentar los incrementos de población urbana, **el envejecimiento y obsolescencia de la infraestructura**, así como los retos derivados del cambio climático. La regulación de estas aguas es una cuestión de eficiencia económica y ambiental, y requiere un enfoque de **sistema** urbano (nuestro énfasis). Como bien lo expresa **Butler et al (2025)**, a menos que ocurra una crisis, no parece haber mayor preocupación por el drenaje urbano.

En Europa se tienen avances en materia de regulación de aguas pluviales (**Furtado et al, 2022**, p. 4). La gestión de estas aguas de aguas recae en la Directiva Marco de Agua (WFD, por sus siglas en inglés) 2000/60/EC-ecocéntrica – y además la Directiva de Inundaciones (FD por sus siglas en inglés) céntrica humana. En el Reino Unido se tiene un sistema complejo y sofisticado, compuesto por la agencia reguladora económica de los servicios de agua (*Ofwater*), la agencia ambiental (EA) y el inspectorado del agua potable (DWI). Sin embargo, como ocurre en otras partes del mundo, los presupuestos para este sistema no guardan correspondencia con las demandas por más recursos. En América Latina el panorama es aún más desalentador. Aun en Chile la regulación sobre este tema prácticamente no existe. Vale la pena señalar que, como pasa en México y otras partes de América Latina y el mundo, lo anterior se debe, en gran medida, a la ausencia de institucionalización y de políticas.

Resultados y discusión sobre gestión de aguas pluviales

La gestión de las aguas pluviales es un servicio intermitente que no es siempre visto como importante, de tal forma que las inversiones requeridas siempre son insuficientes, Es solamente cuando hay una crisis que la decisión política se hace presente, aunque con una visión de corto plazo. Como bien lo expresa **Butler et al (2025)** en torno al drenaje urbano:

“La operación y el mantenimiento (O&M) desempeñan un papel clave para asegurar el desempeño sostenible de cualquier sistema de drenaje urbano del mundo. Hay una tentación de asumir que si no hay problemas inmediatos, no hay necesidad de la O&M. Sin embargo, los sistemas de drenaje se corroen, erosionan, obstruyen, colapsan, y finalmente se deterioran al punto de falla y más allá. Así, O&M es esencial para todos los sistemas”. (p. 414). “...Los activos del drenaje urbano son de un gran valor económico, ambiental y social”. (p. 447). Al final del día se trata de moverse hacia una gestión del agua urbana sostenible y resiliente (p. 572)

Para **Ma et al (2024)** se trata de optimizar la gestión de inundaciones urbanas. Para estos autores los eventos de lluvia extremos, particularmente los asociados con ciclones tropicales, representan un alto riesgo a los sistemas de drenaje urbano (UDS por sus siglas en inglés). Los existentes UDS, habiéndose establecido hace mucho tiempo, con frecuencia fallan para manejar los eventos extremos causados por ciclones. Estos autores urgen a optimizar la operación de la infraestructura del drenaje urbano y las estructuras hidráulicas. Para ellos la eficiencia de estos sistemas se puede mejorar significativamente al optimizar el UDS sin la expansión de la infraestructura existente o costos adicionales. Aquí radica la necesidad de estudiar su envejecimiento y el remanente de su vida útil, tema central de este proyecto Tec-FGRA. En este contexto también se ubica la excelente presentación del Dr. Carlos Tucci en la conferencia del 20 de noviembre – sobre las inundaciones en Porto Alegre, Brasil - llevada a cabo como parte de este proyecto.

Modelos basados en agente para el análisis de riesgos de inundaciones

El modelo para la seguridad de la vida (LSM por sus siglas en inglés) se utiliza en la planeación de emergencias y el análisis de riesgo de inundaciones y fallas de presas (**Lumbroso et al, 2023**). La principal contribución del modelo LSM radica en la posibilidad de estimar la influencia de la intervención de política pública para reducir las posibles fatalidades. Es decir, se trata de un software orientado a la reducción de los riesgos sociales derivados de fallas en las presas, para asegurar que ellos son tan bajos como sea posible.

2.1.8 Fenómenos hidrometeorológicos extremos e infraestructura resiliente: Marco analítico

El cambio climático está imponiendo nuevos retos a las sociedades, las economías, y al ambiente. Como bien lo subrayó hace casi 10 años - haciendo eco del consenso internacional - la Corporación Financiera Internacional (del Grupo Banco Mundial), el cambio climático amenaza la infraestructura que es crítica para el desarrollo e impone grandes

riesgos a la economía (**IFC, 2016**). Carreteras, aeropuertos, sistemas de agua y plantas de energía son vulnerables a cambio climático. Fuertes tormentas y sequías severas pueden causar interrupciones en la actividad económica. Inversionistas y compañías privadas que desarrollen proyectos de asociación público-privadas, necesitan abordar los riesgos climáticos al planear y construir estos proyectos. La incertidumbre asociada con estos riesgos hace muy retadora su incorporación en la planeación de los proyectos.

El Reporte de Riesgos Globales, publicado por el Foro Económico Mundial, lo ha venido señalando muy consistentemente. En su edición 2025 se enfatiza que en los siguientes 10 años los riesgos ambientales serán la mitad de la lista de los 10 riesgos más severos. Llama la atención que los fenómenos meteorológicos extremos (sequías e inundaciones) ocupan la primera posición (**WEF, 2025**). En la edición 2026 los riesgos ambientales pierden relevancia en el corto plazo (2 años), aunque se mantienen como la amenaza más grave a largo plazo”. También se resaltan los eventos de cambio climático extremos (**WEF, 2026**).

El reporte de dos años atrás concluía con la necesidad de un manejo más proactivo y riguroso de los riesgos, basado en cuatro principios (**WEF, 2023**): 1) fortalecer la identificación de los riesgos y de su perspectiva futura; 2) recalibrar el valor presente de riesgos futuros; 3) invertir en la preparación de riesgos transversales, y 4) robustecer la preparación y respuestas cooperativas.

La firma británica AON, especializada en servicios de gestión de riesgos y seguros, estimó que en el primer semestre de 2023 las pérdidas derivadas de estos desastres superaron por mucho el promedio global de lo que va en el siglo XX. Las pérdidas económicas se calcularon en USD 194 mil millones, las pérdidas aseguradas en USD 53 mil millones, y las defunciones en 63,800.⁷ Otra estimación para el costo económico de los eventos climáticos extremos entre 2000 y 2019, lo ubica en USD 2.86 billones.⁸ Este informe, basado en datos del Banco de Desarrollo de América Latina (CAF), señala que en el 2005 se tuvieron grandes afectaciones por los huracanes Katrina, Rita y Wilma; y en el 2017 correspondieron a los huracanes Harvey, Irma y María.

Por lo que se refiere a las sequías, estas tienen fuertes impactos en la sociedad, la economía y el ambiente. La agricultura es un ejemplo. Un reporte relativamente reciente de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) lo señala con claridad (**Pek y Salman, 2023**). Se tienen riesgos y pérdidas económicas y sociales cuyo abordaje en planes de sequía es costoso y altamente demandante de recursos. En este sentido, un reto urgente es encontrar las formas para canalizar mayores recursos financieros para la gestión integrada de sequías.

La literatura internacional muestra, sin embargo, que la construcción de resiliencia a los impactos de fenómenos climáticos requiere de una valoración muy cuidadosa de los riesgos y vulnerabilidades. En este contexto se ubica, por ejemplo, el informe del Instituto de la Tierra, de la Universidad de Columbia, el cual demuestra que hay riesgos económicos

⁷ Estas cantidades son superiores a las registradas en cada primer semestre del periodo 2000-2023. Fuente: *El Norte*, 04.11.2023, sección Negocios, con datos de *The Wall Street Journal*.

⁸ *El Norte/Reforma*, 23.10.2023, con datos del Banco de Desarrollo de América Latina y el Caribe (CAF).

ausentes en la valoración que normalmente se hace sobre el cambio climático. Vale la pena la referencia textual a esta perspectiva (**Defnes et al, 2019, p. 3**):

“El análisis económico que se expresa solamente en términos de los efectos en el producto (como el PIB), o que solamente extrapola de experiencias pasadas, o que usa una tasa de descuento inapropiada, no proporciona una indicación clara de los riesgos potenciales”. Es decir, sólo se tienen aproximaciones a la magnitud de los daños asociados con los desastres.

Más recientemente, se ha prevenido de que estos fenómenos también pueden generar riesgos a la estabilidad del sistema financiero (**OECD, 2024d**). Lo anterior se ha venido discutiendo en los círculos financieros internacionales y de México. El caso del Reino Unido es muy ilustrativo. El Banco de Inglaterra (BoE, por sus siglas en inglés) ha publicado diversas regulaciones para integrar los riesgos climáticos en los marcos de capital de bancos y aseguradoras.⁹ El BoE tiene incertidumbre de si estas instituciones están lo suficientemente capitalizadas para las pérdidas relacionadas con el clima, las cuales requieren enfoques de gestión más orientados al futuro que otros riesgos, incluyendo el desarrollo de métricas para examinar los riesgos y las oportunidades climáticas.

Una agenda para la transformación se intitula el reporte sobre los futuros climáticos financieros, publicado por la OCDE, el Banco Mundial y Naciones Unidas en 2018. Este informe coloca en el lugar central la triada formada por clima, **la infraestructura** (nuestro énfasis) y las finanzas. Al igual que el reporte del BoE, se hace un llamado para repensar el sistema financiero y realinear los flujos en la infraestructura con los riesgos y oportunidades climáticas de largo plazo (**OECD/The World Bank/UN Environment, 2018**).

Vale la pena subrayar que los riesgos climáticos mantienen una fuerte incidencia en la infraestructura hidráulica. También se ha venido enfatizando la necesidad de construir, operar y mantener infraestructura resiliente al clima. Estas exigencias son particularmente importantes ante amplios sistemas de infraestructura que están envejeciendo. Como lo argumenta **Ganguly et al (2021)**, resulta de especial relevancia abordar la resiliencia de la infraestructura crítica ante los extremos climáticos. **Stewart et al (2024)** documentan muy exhaustivamente los impactos del clima en el deterioro de la infraestructura, por lo que se proponía un diseño basado en riesgos para su diseño y gestión. De acuerdo con estos autores, la ingeniería adaptativa al cambio climático involucra la estimación de los riesgos, costos y beneficios de las estrategias adaptativas al clima.

Más recientemente, **Radvanovsky & McDougall (2024)** proponen lo que se conoce como el ciclo de gestión de emergencias para abordar los principales retos climáticos en una forma sistémica. Se subraya la necesidad de mejorar la orientación, la toma de decisiones y las acciones sobre las variadas y complejas interrelaciones entre cambio climático y la infraestructura crítica (pp. 262-263). Estos autores encuentran que se tiene un cambio de

⁹ El Banco de Inglaterra publicó un reporte referente sobre el tema, el 13 de marzo de 2023.

<https://www.pwc.co.uk/industries/financial-services/understanding-regulatory-developments/boe-assesses-integration-of-climate-risks-into-capital-framework.html>

pensamiento sobre la protección de esta infraestructura, más allá de simplemente robustecer los sistemas para su adaptabilidad y resiliencia. Hay un cambio en los procesos de diseño, de las mejores prácticas a gestión centrada en riesgo, y aún hacia estructuras basadas en principios orientados en la ingeniería. Estos cambios no ocurren, sin embargo, uniformemente en los distintos sectores.

De todo lo anterior se desprende que el financiamiento se convierte en un nudo central al discutir infraestructura resiliente al clima. Como bien lo documenta el Panel Intergubernamental de Cambio Climático, en su Sexto Reporte de Valoración 2023 (<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>) las medidas de adaptación pueden efectivamente construir resiliencia, pero se necesita más financiamiento para escalar soluciones. Esto es de fundamental relevancia en la gestión de la infraestructura hidráulica que envejece. Dada esta significancia para el país, el capítulo 6 aborda el marco financiero-presupuestario, y el capítulo 7 discute lo concerniente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos y la infraestructura resiliente.

2.2 Marcos de análisis y caracterización de la infraestructura

2.2.1 Reporte de Infraestructura de la Asociación de Ingenieros Civiles de Estados Unidos (ASCE) 2025

Este es un reporte muy influyente, no solo en Estados Unidos sino también en otras partes del mundo. Su publicación es muy esperada por diferentes instituciones y actores de la sociedad norteamericana. Se publica cada cuatro años desde 1998. Se trata de un reporte nacional que califica 18 sectores de infraestructura para cada estado de la Unión Americana. Este informe afecta la reputación y calidad crediticia de los sectores y estados, por lo cual es muy esperado en los ámbitos económico-financieros. Una aportación de este informe es que los sistemas se consideran como interconectados. Como se encuentra en la literatura, se trata de un sistema de sistemas. Uno de los grandes mensajes de este informe es que la infraestructura de los Estados Unidos está envejeciendo, lo cual requiere atención urgente.

La **Tabla 2.1** contiene la metodología seguida para calificar la infraestructura en los Estados Unidos. La calificación se basa en ocho criterios cuya descripción se presenta en forma de preguntas. Como sería de esperarse, hay criterios relacionados con la capacidad, condición y mantenimiento de la infraestructura, así como de las necesidades futuras y el financiamiento. La resiliencia ocupa una parte muy importante en el reporte.

Tabla 2.1 Metodología de la ASCE para calificar la infraestructura en Estados Unidos, 2025

Criterio	Descripción (literal)
1 Capacidad	¿La capacidad de la infraestructura va a soportar las demandas actuales y futuras?
2 Condición	¿Cuál es la condición actual y en el futuro cercano de la condición física?
3 Financiamiento	¿Cuál es el actual nivel de financiamiento de todos los niveles de gobierno, comparado con las estimaciones de las necesidades financieras?
4 Necesidades futuras	¿Cuál es el costo para mejorar la infraestructura? ¿los futuros prospectos financieros abordarán esta necesidad?
5 Operación y Mantenimiento	¿Cuál es la habilidad del dueño de la infraestructura para operarla y mantenerla adecuadamente? ¿Cumple la infraestructura con las regulaciones gubernamentales?
6 Seguridad Pública	¿En qué sentido la seguridad pública está amenazada por la condición de la infraestructura y cuáles podrían ser las consecuencias de la falla?
7 Resiliencia	¿Cuál es la capacidad del sistema para prevenir o protegerse contra amenazas multi-riesgo y accidentes? ¿Qué tan capaz es para rápidamente recuperar y reconstituir servicios críticos con consecuencias mínimas a la seguridad y salud pública, la economía y la seguridad nacional?
8 Innovación	¿Cuáles son las técnicas nuevas e innovativas, materiales, tecnologías y métodos para entrega de resultados que se están implementando para mejorar la infraestructura?

Fuente: ASCE (2025, p. 5)

Resultados y escalas de calificación 2025

Durante los últimos años la infraestructura hidráulica de los Estados Unidos se ha deteriorado. Esto aparece en la **Tabla 2.2**. La escala va de A (excepcional) a E (fallido). C significa mediocre (requiere atención) y D es pobre (en riesgo). Si bien a nivel general la calificación se ha recuperado (Calificación de C en 2025, la misma que tenía en 1988), en el caso del agua la situación no parece haber mejorado. Solo en agua potable la calificación

es de C-. En los otros tres casos la nota es de D para el drenaje y de D+ para presas y agua residual.

Tabla 2.2

ASCE's Infrastructure Report Card, 2025. Resultados y escalas de calificación.

Categoría	1988	1998	2001	2005	2009	2013	2017	2021	2025
Presas	-	D	D	D+	D	D	D	D	D+
Agua potable	B-	D	D	D-	D-	D	D	C-	C-
Drenaje								D	D
Agua residual	C	D+	D	D-	D-	D	D+	D+	D+
General (18 categorías)	C	D	D+	D	D	D+	D+	C-	C

A – Excepcional. Adecuado para el futuro

B – Bueno. Adecuado por ahora

C – Mediocre. Requiere atención

D – Pobre. En riesgo

E – Fallido. Crítico

Fuente: ASCE (2025), p. 221; Herrera (2021), pp. 20-21

La edición 2025 de este reporte presenta tres grandes hallazgos, cuya expresión literal es la siguiente:

1 Los sistemas de envejecimiento de la infraestructura son crecientemente vulnerables a los desastres naturales y eventos climáticos extremos, creando riesgos inesperados y a menudo inevitables para la seguridad pública y la economía. Ver en este sentido la coincidencia del Reporte de Riesgos Globales 2025, ya mencionado (**WEF, 2025**). Cinco de los diez riesgos más críticos identificados por este informe se asocian con fenómenos meteorológicos extremos y ocupan la primera posición.

2 Las inversiones recientes federales y estatales han tenido un impacto positivo, pero la fuerza completa del incremento en financiamiento tomará varios años para realizarse. Como contexto se tienen largos periodos de abandono del gobierno federal, con el creciente rezago en el mantenimiento de los sistemas de infraestructura.

3 Datos no confiables o no disponibles sobre indicadores de desempeño clave continúan impactando ciertos sectores de la infraestructura. Muchas categorías de infraestructura carecen de un inventario básico de activos. Los datos – disponibles públicamente, como una práctica rutinaria y confiables – deberían ser un estándar en todos los sectores de infraestructura, para orientar de mejor forma las inversiones de recursos limitados.

2.2.2 Condiciones de deterioro y sistemas de gestión del mantenimiento. El caso de Japón

Además de indicadores y métricas específicas, se tienen marcos para categorizar el estado de la infraestructura (y su deterioro), así como los correspondientes sistemas de gestión del

mantenimiento. En la **Tabla 2.3** se presenta el caso japonés, el cual pudiera resultar de interés para México. Las condiciones de deterioro van de lo razonable (Categoría A) a lo crítico (Categoría E). En el primer caso el deterioro no se presenta en la mayoría de los organismos de agua. En el segundo el deterioro es tan severo que urgen medidas para contrarrestarlo. En función de las condiciones de deterioro, también se tienen las categorías B (satisfactorio), C (Cautela) y D (advertencia).

Relacionado con estas condiciones de deterioro los sistemas de gestión del mantenimiento pueden ser ascendentes, planos o descendentes. En el primer caso se fortalecen los sistemas para mejorar las condiciones del deterioro. En el segundo caso, como su deriva de su nombre, sin el cambio en los sistemas de gestión tampoco mejoran las condiciones de deterioro. Finalmente, en el sistema descendente empeoran las condiciones de deterioro al no mejorar la gestión del mantenimiento.

Tabla 2.3. Definiciones de deterioro y sistemas de gestión de administración en Japón, 2020

Condiciones de deterioro

A (razonable)	B(Satisfactorio)	C(Cautela)	D(Advertencia)	E (Crítica)
El deterioro no ha ocurrido en la mayoría de los organismos de agua	El deterioro ha ocurrido en algunos organismos de agua	El deterioro ha ocurrido en un número moderado de organismos de agua	El deterioro ha ocurrido en varias instalaciones, las reparaciones y refuerzos son necesarios	El deterioro es severo, urgen medidas para contrarrestarlo.

Sistemas de gestión del mantenimiento

Ascendentes	Planos	Descendentes
Sistemas fortalecidos que mejoran las condiciones del deterioro	Al no cambiar los sistemas de gestión para el mantenimiento, tampoco mejorarán las condiciones de deterioro	Al no mejorar los sistemas de gestión del mantenimiento, el deterioro va a empeorar

Fuente: Sakai et al (2020, tabla 1, p. 2)

2.2.3 Gestión de activos de multi infraestructura integrada

Como marco, la gestión de activos de infraestructura constituye una herramienta analítica muy valiosa para la planeación de la infraestructura.¹⁰ Entre sus muchas bondades está la incorporación de perspectivas interdisciplinarias que interconectan los diferentes sistemas de infraestructura. Este marco es muy útil para modelar las posibles fallas y estimar cuando se necesita la rehabilitación (**Daulat et al, 2024**). Estos autores presentan los siguientes elementos, pensados para orientar la toma de decisiones (pp. 883-885):

¹⁰ Este tema se aborda aquí como marco de análisis, ya se abordó antes como asunto de fondo detrás de la difícil decisión de rehabilitar o reemplazar infraestructura.

- Se utilizan modelos temporales de deterioro para estimar la probabilidad de falla en el tiempo. Se señala la dificultad para obtener los datos que alimentan los modelos.
- Los modelos ayudan a saber cuándo un activo ha alcanzado o cruzado un cierto nivel, indicando la necesidad de intervención. En este sentido se puede utilizar un modelo probabilístico o de *machine learning*
- Interfase con *project development*. Un mapa puede mostrar las áreas donde dos o más infraestructuras necesitan rehabilitación simultáneamente.
- Indicadores de utilidad:
edad de la tubería al tiempo de la ruptura de la tubería.
edad de la tubería al tiempo de inspección.
- Una condición 1 indica que la tubería está en muy buenas condiciones, mientras que condiciones más altas significan un empeoramiento de las condiciones.
- Condición 5 designa a la tubería en las condiciones más pobres, las cuales necesitan atención inmediata.
- En este estudio las clases de condiciones más severas se agregaron en el grupo de ‘malas condiciones’, mientras que las clases de condiciones 1 a 3 fueron agrupadas en ‘buenas condiciones’.
- Este enfoque conduce a la creación de una variable binaria para el modelo de deterioro, permitiendo distinguir entre tuberías que necesitan intervención y aquellas que están en relativamente buen estado.

Estos autores proponen un marco relativamente sencillo para caracterizar la infraestructura multi-integrada, recopilando información de una manera asequible. Este es el esquema propuesto.

Datos disponibles para la realización de trabajos en un área en particular (p. 890)

Activo	Drenaje	Agua	Calles
• Año de construcción • Información del material • Edad • #incidentes/rupturas • Inspecciones • Rehabilitación planeada • Área sombreada (m2) • Volumen sombreado (m3)			

Nota: el énfasis sobre año de construcción y edad son propios.

2.2.4 Marco analítico para la renovación y/o reemplazo de infraestructura: El caso de Holanda

Holanda representa un muy buen caso de estudio para mostrar la significancia y aprendizajes conceptuales y prácticos en torno al reemplazo de infraestructura hidráulica de protección. (**Bernardini et al, 2014; Van Vuren et al , 2015**). Las estructuras de protección

se diseñaron para durar entre 80 y 100 años.¹¹ En las siguientes décadas muchas de estas estructuras, debido a su edad, necesitarían ser reemplazadas o renovadas, dado que muchas estarían acercándose al final de su ciclo de vida. Los autores también referían los cambios en el entorno físico y social influenciando la necesidad y el tiempo del reemplazo. La pregunta que se planteaba era cómo incorporar suficiente flexibilidad en tiempo, espacio y diseño técnico, a efecto de tomar las medidas correctas en el tiempo correcto, y con las estrategias de inversión adecuadas. Cabe aclarar que el envejecimiento de la infraestructura hidráulica no se consideraba como la única razón para reconsiderar su diseño.

Ante los retos derivados del cambio climático y el propio desarrollo económico, desde 2010 el gobierno holandés formuló el programa Delta, en el marco del cual se diseñaron estrategias de corto y largo plazo (con los años 2050 y 2100 en el horizonte), para proteger al país de las inundaciones y asegurar la provisión de agua para la población y las actividades económicas. Es en este contexto que se establecen fuertes conexiones entre el programa Delta y las estrategias de renovación y reemplazo de la infraestructura (**Bernardini et al, 2014**). Se parte de un marco integrativo que incluye herramientas técnicas y métodos. Con lo anterior se puede estimar la vida útil técnica y funcional de las estructuras hidráulicas. Estas herramientas y métodos también ayudan en la valoración del final de la vida útil técnica y funcional de las estructuras, tomando en consideración la incertidumbre sobre el desarrollo futuro (p. 3).

Retos

Habiendo establecido el carácter multifuncional de las estructuras, se tienen retos de fondo que se tienen que considerar como parte del reemplazo. Entre los más importantes están los siguientes (**Bernardini et al, 2014, pp. 2-3**):

- Al considerar el alto costo de reemplazo de la mayoría de las estructuras, se constituirá una parte considerable del presupuesto disponible para la gestión del agua.
- El reemplazo de las estructuras hidráulicas tiene un gran impacto social, en términos de funcionalidad y costos. Por lo tanto, el momento de reemplazo de estas estructuras es un tiempo adecuado para re-evaluar el diseño y funcionalidad deseada de los sistemas de infraestructura.
- Nuevos retos para la planeación física y financiera.
- Cambio en recursos – de la construcción de nueva infraestructura al mantenimiento y reemplazo de la infraestructura existente para las siguientes décadas.

Se reconoce que el cambio climático y el crecimiento económico van a demandar grandes inversiones y un rediseño significativo de la infraestructura. Se requiere entonces un enfoque de política pública técnicamente inteligente. Se propone un enfoque adaptativo cuyos principales elementos son:

- Conectar la actual toma de decisiones con desarrollo futuros.
- Trabajar con rutas adaptativas en lugar de horizontes fijos; calcular los costos, beneficios y riesgos de las diferentes rutas adaptativas.

¹¹ El grueso de esta sección se apoya en estos autores; en ocasiones de manera textual.

- Incorporar flexibilidad en la toma de decisiones; tomar las más adecuadas en el tiempo correcto.
- Combinar las inversiones público-privadas.

Valoración del final de la vida útil funcional y técnica para las estructuras hidráulicas

Esta valoración requiere de varias consideraciones. A continuación se incluyen varias de ellas (pp. 4-10) con relevancia para este proyecto de Investigación Tec-FGRA.

- Dado el actual envejecimiento de la actual reserva de las estructuras hidráulicas y el alto costo de reemplazar cada una de ellas, se tiene la necesidad de pronosticar su remanente de la vida de servicio.
- La manera más simple de pronosticar el remanente de servicio de la vida útil de las estructuras hidráulicas es simplemente tomando la vida de diseño de cada estructura como la edad de reemplazo. Usando información genérica como el año de construcción y la vida de diseño (80 o 100 años), se puede tener una estimación del final de la vida útil (al adicionar la vida de diseño al año de construcción)
- Este enfoque básico y rápido, sin embargo, no toma en cuenta diferentes consideraciones:
 - + Circunstancias cambiantes en la etapa de operación. Una de las preocupaciones primarias se refiere al gradual e incierto deterioro de la estructura hidráulica en el tiempo. Esto afecta el remanente de la vida útil de la estructura.
 - + El cambio climático y el crecimiento económico podrían afectar los requerimientos funcionales de la estructura.
 - + Funciones múltiples. Las estructuras hidráulicas, como ya se ha referido antes, pueden servir diferentes funciones. Según la función, el final de la vida útil se puede alcanzar más temprano o más tarde.
 - + Incertidumbre. Se tienen muchas incertidumbres para pronosticar el final de la vida útil de una estructura hidráulica.
- Con base en todo lo anterior, **la edad de reemplazo es incierta** (nuestro énfasis).
- Se subraya la importancia de contar con una indicación más precisa de cuándo una estructura hidráulica necesita ser reemplazada. Se requiere un enfoque unificado para determinar el remanente de la vida útil de cada estructura, reconociendo el hecho de que esta estimación es incierta.

Orientación de un enfoque unificado

En un enfoque unificado, los resultados intentan un balance entre un límite bien calibrado (el cual contiene la actual edad de reemplazo) y uno informativo (el límite es tan estrecho como es posible). Para estimar la vida útil técnica se requiere de diferentes tipos de datos. Primeramente, hay información genérica como el tipo de construcción, el año de construcción, la vida de diseño (80 o 100 años), la localización geográfica, etc. Segundo, a cada estructura se le asigna una calificación cualitativa basada en una inspección visual. Tercero, los expertos pueden dar estimaciones del remanente de la vida útil de las estructuras.

Toda esta información y datos se pueden combinar con un enfoque probabilístico, el cual proporciona una distribución funcional del fin de la vida útil técnica de las estructuras. La vida útil funcional de las estructuras se estima usando un análisis de escenario que resulta

en un marco con un límite inferior y superior de la edad de reemplazo. Se contemplan diferentes escenarios para considerar cambio climático y el desarrollo socioeconómico, teniendo al 2050 y al 2100 como horizontes. Esto señala la importancia de considerar el largo plazo en la planeación de infraestructura.

*Fin de vida útil técnica*¹²

Se presentan dos enfoques para determinar los marcos para el reemplazo de las estructuras: 'DISK PRO' y 'RINK Delta T'. El propósito de DISK PRO es definir un modelo probabilístico que representa la incertidumbre sobre la edad de reemplazo de una estructura, el cual se puede actualizar incorporando datos a través de estadísticas bayesianas. Para ello se utiliza un modelo univariado bayesiano. El RINK Delta T ofrece una estimación más refinada. Este enfoque se basa en la valoración estructural de la parte 'civil' (concreto) de las estructuras, analizando la estabilidad de estas partes. El Análisis del Costo del Ciclo de Vida muestra que 'el final de la vida' de las partes del concreto determinan en su mayor parte el final de la vida de la estructura total.

El reemplazo de otros subsistemas (como las partes técnicas, puertas de acero o instalaciones electrotécnicas) es todavía costo efectivo hasta un máximo de dos años (máximo 5) antes del final de la vida de las partes civiles. Los límites del intervalo final de la vida útil está dado por el momento en que las condiciones hidráulicas cruzan un límite crítico. Este momento depende del escenario delta.

También se propone una metodología de puntos de inflexión y el desarrollo de rutas adaptativas, la cual necesita una valoración futura de la funcionalidad y el desempeño de las estructuras, de acuerdo con los requerimientos correspondientes y el ciclo de vida (**Van Vuren et al, 2015**). Si se encuentra que una estructura ya no podrá cumplir con una función en cierto tiempo, entonces los puntos de inflexión se recorren hacia atrás en el tiempo para hacer los ajustes en el sistema, de tal forma que se demore la necesidad de renovación o reemplazo a gran escala. Con ello, las rutas adaptativas proporcionan a los tomadores de decisión una muy valiosa oportunidad para aumentar o deducir funcionalidad de las estructuras, llevando a cabo las estrategias conducentes para alcanzar los objetivos deseados.

2.2.5 Indicadores de desempeño para los servicios de agua de la Asociación Internacional del Agua

La Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) es un referente internacional sobre indicadores de desempeño (PI por sus siglas en inglés) de los servicios de agua (**IWA, 2017; IWA, 2020**). La Asociación publica un manual con las mejores prácticas, el cual es ampliamente consultado y usado por organismos de agua. Se espera que la estructura de los PI haga sentido para cada organismo de agua y para todos los

¹² Este apartado se basa textualmente en Bernardini et al (2014, p. 9)

usuarios del sistema. Los indicadores se agrupan en seis grupos (**IWA, 2017**, p. 36; 339-346).

En la relación que sigue, el paréntesis indica el número de variables de cada grupo:

- Recursos hídricos (22)
- Personal (26)
- Físicos (25)
- Operacionales (65)
- Calidad del servicio (23)
- Económico-financieros (58)

Se enfatiza que la selección y uso de los PI requieren de mucha claridad y el cumplimiento de varios requisitos, de tal forma que se tenga la validez y uso apropiados para orientar decisiones informadas. Estos requerimientos se aplican tanto a los indicadores individuales como a los colectivos. La selección de variables también debe observar ciertos requisitos, incluso las que corresponden a fuentes externas. Es también el caso de la información contextual.

Individualmente, los indicadores deberían cumplir con los siguientes requisitos (descripción textual) (p. 12):

- Claramente definidos, con definiciones concisas
- Razonablemente alcanzables
- Auditables
- Tan universales como sea posible
- Sencillos y de fácil entendimiento.
- Cuantificables tanto como sea posible
- Incluir información de calidad de las variables.

Colectivamente, los PI deberían de cumplir con los siguientes requisitos (**p. 16**):

- Cada PI debería de proporcionar información significativamente diferente de los otros PI en el sistema.
- Definiciones de indicadores de desempeño deberían ser inequívocos (este requisito se hace extensivo a sus variables).
- Solo PI que se consideren esenciales para la evaluación de un desempeño efectivo deberían ser establecidos.

Variables. Cada variable debería cumplir con los siguientes requisitos (**p. 17**):

- Definiciones deberían ser inequívocas
- Apropiado para la definición del PI para el que se usa.
- Razonablemente alcanzable
- Referida a la misma área geográfica y el mismo periodo de tiempo o fecha de referencia como el PI para el que se usa.
- Ser confiable y preciso tanto como lo requieran las decisiones a las que van a apoyar.
- Incluir información sobre la calidad de los datos.

Algunas variables son obtenidas de fuentes externas a los organismos de agua, por lo que no hay control sobre la disponibilidad y calidad de esta información. En este sentido, las variables deberían además cumplir con los siguientes requisitos (p. 17):

- En la medida de lo posible ser obtenidas de departamentos oficiales.
- Ser fundamental para el análisis del PI o su interpretación
- Colectivamente ser tan pocas como sea posible.

La información contextual no tiene el mismo nivel de detalle y confianza que los PI y sus variables. En este sentido, los indicadores contextuales deberían cumplir con los siguientes requisitos:

- Definiciones deberían ser inequívocas;
- Ser razonablemente alcanzables
- Si es externa, ser obtenida siempre que sea posible de departamentos oficiales.
- Ser fundamental para el PI
- Colectivamente ser tan pocos como sea posible.

2.2.6 Medidas adaptativas al cambio climático: aumentar capacidad de almacenamiento en presas y reducción de fugas (Caso de Bergen, Noruega)

Es previsible que el cambio climático va a afectar el almacenamiento de agua en las presas. A lo anterior se adiciona las fugas de agua en los sistemas de distribución derivadas del deterioro de la infraestructura, así como el aumento de la población; en conjunto lo anterior incrementa la demanda de agua en las ciudades. En su trabajo sobre Bergen, Noruega, **Kristvik et al (2019)** construyen un índice de disponibilidad de agua para cuantificar el impacto del cambio climático, el crecimiento poblacional y el envejecimiento de la infraestructura, así como los efectos de dos medidas adaptativas tales como el incremento en la capacidad de almacenamiento y la reducción de fugas. Se demuestra que estas medidas pueden contrarrestar los efectos del cambio climático.

Estos resultados muestran la necesidad de combinar la gestión del agua basada tanto en la oferta como en la demanda. Estudios previos para esta misma ciudad sobre la disponibilidad de recursos hídricos ante el cambio climático, sugieren un conflicto potencial entre la oferta y la demanda a menos que se reduzcan las pérdidas de agua en los sistemas de distribución (**Kristvik y Riisnes, 2015**). Lo anterior abona en la construcción de un marco conceptual coherente con implicaciones de política pública que hacen mucho sentido.

Los análisis de sensibilidad del WAI consideran tres escenarios (base, bajo y alto) para la combinación de cambios en la gestión de las fugas, el crecimiento poblacional y la capacidad de almacenamiento ante el cambio climático. Estos escenarios se proyectan hasta el 2100. El estudio para Bergen muestra, como también se encuentra en otros trabajos, que incrementar la capacidad de almacenamiento en las presas puede ayudar a manejar de mejor forma el alza en las variaciones estacionales. Otra conclusión es que ante un escenario *business as usual* se incrementa la vulnerabilidad en el sistema de oferta debido a una menor y menos predecible disponibilidad de agua. Finalmente, se encuentra que reducir las fugas a un nivel de 20% para 2024 (del entonces existente 31%) tendría

aproximadamente el mismo efecto que un incremento del 10% en la capacidad de almacenamiento. Por supuesto, a lo anterior habría que adicionar el análisis económico-financiero de los costos involucrados en la implementación de las dos medidas ya referidas para incrementar la disponibilidad de agua: la reducción de fugas y el aumento en la capacidad de almacenamiento.

2.2.7 Análisis de riesgo y el juicio de los expertos

El diagnóstico y el análisis de riesgo son esenciales para asegurar la seguridad de las obras de infraestructura hidráulica, especialmente cuando éstas están envejeciendo; aquí el papel de los expertos cobra mucha relevancia. Se tienen métodos como modelaje físico para analizar la estabilidad, análisis estadístico para el monitoreo de datos, y modelaje funcional para el análisis de la seguridad operativa. Sin embargo, el juicio de los expertos es necesario cuando los trabajos son complejos y únicos, cuando los datos son imprecisos o insuficientes y cuando un diagnóstico preliminar o análisis detallados se llevan a cabo. Con su experiencia y conocimiento, los especialistas pueden aportar recomendaciones para abordar problemas específicos. **Peyras et al (2006)** lo ha venido señalando desde hace ya casi 20 años para las presas, aunque esta experiencia es valiosa para todos los sistemas de infraestructura.

El análisis de riesgo considera una base de datos histórica sobre el envejecimiento, que pueda ser expandida regularmente; y métodos para analizar críticamente la pérdida de desempeño al nivel de componente y para el sistema de infraestructura en conjunto. Estos métodos no producen un análisis detallado del desempeño del sistema, su cambio en el tiempo, y su confiabilidad. El análisis de criticalidad simplemente identifica las obras más críticas, sus componentes y los escenarios y el tiempo disponible para llevar a cabo mantenimiento y reparaciones programadas. Con estas bases será posible realizar investigaciones más detalladas, como sean requeridas. Como se expresa, estas consideraciones pueden ser de valor para otros sistemas de infraestructura hidráulica y no solo para las presas.

2.3 Modelos y métricas sobre el envejecimiento de la infraestructura

2.3.1 Índice de disponibilidad de agua

El cambio climático, el crecimiento poblacional y el envejecimiento de la infraestructura están interrelacionados. Adicionalmente al impacto adverso del cambio climático en el almacenamiento de las presas, se tienen las fugas en los sistemas de distribución ocasionadas por el deterioro de la infraestructura y el aumento de la población. Todo esto incide en una mayor demanda de agua en las ciudades. El índice de disponibilidad de agua (WAI, por sus siglas en inglés) conjunta todo lo anterior en dos medidas adaptativas para contrarrestar los efectos del cambio climático: incrementar la disponibilidad de almacenamiento y la reducción de fugas.

El WAI se define como la relación entre la disponibilidad y la capacidad del sistema para almacenar agua (Ecuación 2.2)

$$WAI(t) = \frac{SW(t) - RR(t)}{SC} \quad (2.2)$$

Donde:

$WAI(t)$ es el WAI en tiempo t

$SW(t)$ es el agua almacenada en tiempo t

$RR(t)$ son las reservas de almacenamiento requerido en tiempo t

SC es la capacidad instalada de almacenamiento

En la ecuación (2.2) SW representa el balance entre entradas y salidas de agua de los almacenamientos, de tal forma que esta ecuación se puede re expresar como sigue (Ecuación 2.3)

$$WAI(t) = \frac{SW(t-1) + (Q_{in}(t) - Q_{out}(t))dT - RR(t)}{SC} \quad (2.3)$$

Donde:

Q_{in} representa la entrada de agua a los reservorios de toda el área de captación

Q_{out} se refiere al consumo y al agua que se vierte cuando los reservorios están llenos, así como un flujo regulado según cada caso.

El consumo es definido como:

$$C_{tot} = (1 + a)C_{sp}P \quad (2.4)$$

Donde

C_{tot} = (m³/intervalo o unidad de tiempo)

a es la tasa de fugas

$C_{sp}P$ (m³/población/intervalo o unidad de tiempo) es el consumo específico vinculado con el consumo real de los diferentes usos y P (población) es el número total de personas a quienes se les suministra el agua por el organismo correspondiente).

2.3.2 Modelos y métricas para el análisis de riesgos en los sistemas de distribución ante infraestructura envejecida

La continua operación de infraestructura que envejece representa riesgos en los sistemas de distribución. Esto se observa claramente en los gobiernos y operadores metropolitanos quienes tienen los retos de optimizar inversiones para la rehabilitación de esta infraestructura. En su investigación de la ciudad de Wattrelos, Francia, **Cantos y Juran (2019)**, demuestran que afectivamente la gestión apropiada de activos y la planeación eficiente de la rehabilitación requiere el monitoreo, el análisis de las condiciones y riesgos actuales y futuros de la degradación de la infraestructura, para apoyar la toma de decisiones

orientadas a la significativa reducción de los costos de rehabilitación. El análisis realizado se apoya en datos e información que, sin embargo, difícilmente están disponibles en un contexto como el de México: una base de datos históricos de 74 años, la cual contiene aproximadamente 424 observaciones de falla para el periodo 1991-2004.

La gestión del envejecimiento de la infraestructura hidráulica en general y de agua urbana en particular significa la gestión del riesgo. El diseño de escenarios de riesgo ayuda a tomar decisiones más informadas para priorizar programas de mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de la infraestructura (**Mamo, 2015**). La priorización de los activos de alto riesgo considera su edad, entre varios factores.¹³ Entre las causas de las fallas de esta infraestructura está el deterioro de las redes de distribución y la falla estructural de las tuberías.

Las rupturas de las tuberías pueden causar daños muy significativos a la propiedad, la población, las actividades productivas y de servicios, y el ambiente. Es por ello que el análisis de sus condiciones debería ser muy importante. En términos generales, el riesgo se basa sobre la posibilidad o probabilidad de ocurrencia y de sus consecuencias. Este análisis es esencial para tomar decisiones informadas sobre cuáles activos están en mayor riesgo y cuáles necesitan de atención urgente. En el caso particular de las fugas el análisis preliminar de sus condiciones se puede realizar vía auditorías, la consideración de la demanda *per cápita* o encuestas sobre su detección. Un estudio más detallado incluye el análisis de condiciones críticas y de daño potencial, así como de impacto ambiental o la pérdida del servicio.

Se puede modelar la probabilidad de las fallas en las tuberías. Más específicamente, la probabilidad de falla puede calcularse como una función de la edad, el número previo de rupturas, el tamaño de la tubería y las condiciones de los servicios, lo cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$H(I) = f(a, b, \#s, \dots, n) \quad (2.5)$$

Donde *a* es la edad del segmento de tubería, *b* es el número previo de rupturas, y *#s* representa las condiciones de los servicios. Esta variable mide amenazas tales como la carga vehicular, zonas de alta presión, suelos corrosivos y otras condiciones que podrían causar la falla de la tubería más rápidamente que el promedio; *n* representa otros factores. En el estudio, el número de rupturas de las tuberías provienen de estadísticas nacionales sobre las condiciones promedio de las tuberías, en las que, además, se tiene información sobre los distintos segmentos y su año de instalación. La disponibilidad de este tipo de datos es muy difícil en México.

Se están generando nuevos modelos estocásticos para entender de mejor forma el comportamiento de las fugas en los sistemas de distribución, considerando diferentes materiales de las tuberías (**Beygi & van Zyl, 2024**). Lo que se conoce como índice de fugas de la infraestructura (ILI, por sus siglas en inglés) es ampliamente utilizado como un

¹³ Entre estos factores están los siguientes: mecanismos de falla, historia de instalación, calidad del agua, corrosión, presión, localización, tipo de suelo.

indicador de desempeño. El ILI se define como la relación de las pérdidas actuales a aquellas mínimamente alcanzables.

El trabajo de **Cantos y Juran (2019)**, ya mencionado, confirma que el uso de modelos estadísticos y estocásticos para analizar la relación entre la tasa de falla (FR), la edad (T) y la probabilidad o (riesgo) de exceder una tasa de falla específica ($Pr(FR)$) de una micro zona puede apoyar el análisis de la gestión del riesgo y priorización de las inversiones del mantenimiento y rehabilitación de un sistema de distribución de agua (WDS, por sus siglas en inglés). Más específicamente, lo anterior puede ayudar pronosticar las consecuencias de demorar estos trabajos, al cruzar la tasa de falla contra la edad, y la probabilidad o riesgo contra la edad. Se encuentra que, como es de esperar, el riesgo se incrementa con la edad de la infraestructura. También se sabe que al reducirse la confiabilidad se incrementa la tasa de falla.

Sin embargo, también se señalan las enormes dificultades, largamente conocidas, para, aún en un país más avanzado, contar con los datos pertinentes. Esto se refiere tanto a la red de distribución como a la historia de las fallas en las tuberías (**Jafar et al, 2010; Alegre and Coelho, 2012**). Más específicamente, la evaluación de la degradación del sistema de tuberías exige mucha información del sistema de distribución, que incluye parámetros físicos, ambientales y de operación que han impactado la tasa de falla (FR) durante al ciclo de vida de la infraestructura (**Le Gat and Eisenbeis, 2000; Alegre and Coelho, 2012**).

La tasa de falla (FR) para una micro zona seleccionada indica el número de fallas por unidad de longitud de las tuberías (km) por año, tal como se expresa en la ecuación (2.6)

$$\text{Tasa de falla (FR)} = \text{Número de fallas} / \text{longitud total de las tuberías (km o miles) por año} \quad (2.6)$$

Para cualquier edad (T) la probabilidad de falla se define por la frecuencia de los valores de falla, la cual es equivalente al periodo de retorno del valor FR seleccionado. Para una muestra de tuberías con una muestra promedio de edad (T), la probabilidad P_i de un valor seleccionado sobre el periodo de tiempo seleccionado se define por la distribución de frecuencias de los valores FR:

$$P_i = N_i / NF \quad (2.7)$$

La probabilidad acumulativa PC_i de un valor seleccionado FR_i se refiere a la probabilidad de que un valor FR random sea menor o igual al valor especificado FR_i . La probabilidad (o riesgo) de exceder el valor FR_i está dado por:

$$PR_i = 1 - PC_i \quad (2.8)$$

De todo lo anterior se puede construir una matriz de riesgos para una edad seleccionada (T), en la que se indique el nivel de riesgo a través de un escala-código de colores (por ejemplo, de 1 a 4), que se corresponda con la severidad en el nivel de deterioro de la infraestructura. Lo anterior se puede establecer basándose en la tasa de falla ($FR_i(T)$) para el agrupamiento de tuberías seleccionadas y el nivel de riesgo aceptable excediendo el nivel del valor seleccionado para FR_i . Esto puede tener aplicaciones para México, si incluso solo se realiza una encuesta cualitativa en la que se pregunte a expertos o funcionarios con conocimiento, el nivel de riesgo que se corre en función del deterioro de las tuberías o la

infraestructura en general. Así, por ejemplo, se podría usar un sistema de colores y categorías. Nuestro trabajo sobre el envejecimiento de la infraestructura puede ayudar en esta dirección.

En términos de las consecuencias (de no realizar los trabajos de rehabilitación, y en función de las tasas de falla y los riesgos), éstas pueden ser :

- Insignificantes
- Menores
- Moderadas
- Mayores
- Severas

En términos de la probabilidad de ocurrencia:

- Altamente probable
- Probable
- Ocasional
- Remota
- Improbable

2.3.3 Optimización del mantenimiento, rehabilitación o reemplazo de infraestructura integrada

La gestión de la infraestructura que se está avejentando considera el mantenimiento, la rehabilitación o su reemplazo. Esta decisión, como ya se ha argumentado, no es sencilla. Además de diagnósticos comprensivos sobre el estado de la infraestructura, se necesita una valoración de los recursos financieros disponibles y un análisis cuidadoso de costo beneficio. Dado que casi siempre hay límites financieros, toda vez que se ha decidido rehabilitar, ayudará optimizar esta decisión. En un plan comprensivo de renovación – en el cual se incluyen programas de reparación y rehabilitación – es obligada la preservación del valor y desempeño de los activos de infraestructura.

Si bien la literatura ha abordado este tema, está ausente la optimización de intervalos dentro de la planeación de intervención dinámica en sistemas de infraestructura urbana (**Minai et al, 2024**). Estos autores utilizan este enfoque para la ciudad de Montreal, en la que un tercio de su infraestructura es considerada como regular, pobre o en condiciones de deterioro. Se encuentra que el tiempo en que se lleva a cabo la rehabilitación es crucial para minimizar los costos de inversión. Se demuestra que una rehabilitación considerada para un periodo total de 25 años produce mejores resultados cuando se programa en cuatro fases de seis años cada una, y no en inversiones anuales (25 fases cada una de un año). Los ahorros estimados, entre una y otra opción, son del orden del 25%. Esta optimización significa que al haber inversiones más grandes y en plazos más amplios, se tienen mejores resultados que inversiones limitadas en tiempos más cortos.

Un paso muy importante en el modelo de optimización es la estimación de la confiabilidad o salud de la tubería, es decir de su deterioro, para entonces avanzar en el diseño de las actividades de intervención y sus costos. Esto se muestra en la ecuación (2.9)

$$HR_{tubería_i,t_j} = HR_{tubería_i,t_p} * e^{-\left(\left(\frac{Edad_{tubería_i,t_j}-\gamma}{\alpha}\right)\right)^\beta} \quad (2.9)$$

Esta ecuación es del tipo Weibull en la que $HR_{tubería_i,t_j}$ representa la confiabilidad de la tubería i , $i = 1:n_c$ donde n_c es el número de corredores (cada corredor significa un segmento en la red de distribución). $HR_{tubería_i,t_p}$ indica la salud de la tubería i en un tiempo t ; $Edad_{tubería_i,t_j}$ es la edad de la tubería en el tiempo t_j ; α y β son factores de escala (años, a definidos con base en la vida de servicio de las tuberías, la cual depende del tipo de material (PVC, acero, cemento, etc.) y el parámetro de la forma (mayor que 0); el tercer parámetro de la distribución de probabilidad de Weibull, parámetro (γ) es igual a 0 en este estudio.

2.3.4 Optimización de la renovación de distribución. Análisis de costo-beneficio y programación dinámica (Kim et al, 2024)

Abordar el asunto del creciente envejecimiento de acueductos y tuberías señala la necesidad de un eventual reemplazo o renovación en el largo plazo de esta infraestructura. Las inversiones requeridas, sin embargo, deberán tomar en cuenta, como se sostiene en la sección 2.3.3, las restricciones presupuestales (Kim et al, 2024). Estos autores, después de analizar métodos tradicionales y estadísticos proponen un método de programación dinámica (DP, por sus siglas en inglés) para calcular cuándo es el mejor tiempo para reemplazar la infraestructura.

Se argumenta que el método DP presenta ventajas sobre los métodos más tradicionales. Es ampliamente conocido que el deterioro de las tuberías se debe a diferentes factores: físicos, ambientales y operacionales (Kleiner y Rajani, 2001; 2002; 2022). También se sabe que el deterioro de esta infraestructura – acueductos y redes de distribución – termina por afectar el funcionamiento de la misma, y no proporcionar eficientemente el servicio para cuya prestación se diseñó. Lo anterior conduce, además, a pérdidas directas e indirectas y a daños en otras infraestructuras (Abdel-Mottaleb et al, 2019), en lo que se conoce como efectos en cascada.

En México son más que conocidos los impactos negativos de las reparaciones y reemplazos de las tuberías en las redes de conducción en la movilidad urbana. En el caso de las metrópolis estos impactos, sin cuantificar sistemáticamente, pueden ser muy grandes. En este sentido, las inspecciones, reparaciones y mantenimientos planeados durante la vida útil de las tuberías son esenciales para un buen desempeño. Es claro, sin embargo, que se tienen restricciones financieras para llevar a cabo estas tareas, por lo que los trabajos a realizar deberán considerar las restricciones financieras existentes. Esto es muy claro en el caso de México. Es en este marco que la optimización de las inversiones para la renovación de infraestructura en general, no solo de las tuberías, cobra relevancia. Es decir, precisamente porque se tienen limitaciones financieras se deben optimizar estas

inversiones. En México, como en otras partes del mundo, la decisión de qué y cuándo renovar se hace con base en la urgencia, la experiencia, y los recursos disponibles.

La literatura señala tres grandes factores a considerar para la renovación de las tuberías: seguridad estructural, eficiencia económica del reemplazo, así como la calidad del agua **(Dandy y Engelhart, 2006)**. En el caso de las tuberías de mayor diámetro las dos primeras cobran más relevancia. Dado que la renovación de las líneas de conducción es más costosa que en el caso de pequeñas redes, y dadas las restricciones presupuestales, es deseable que se consideren las alternativas más costo-efectivas **(Kliner & Rajani, 2022)**. En la práctica, sin embargo, y México no es la excepción, los responsables de agua terminan por reemplazar tuberías que ya han rebasado un determinado periodo de uso o fijan un porcentaje (o extensión), en función de la limitada disponibilidad de recursos financieros. Esto es precisamente lo que se encontró en los seminarios llevados a cabo tanto en Monterrey como en Ciudad de y Guadalajara. Si bien se entiende el contexto, es claro que, como se muestra en la literatura internacional, esta lógica conduce a un uso ineficiente de recursos financieros limitados y que compromete la estabilidad del sistema de suministro en el largo plazo **(Taiwo et al, 2023)**.

Al final del día la renovación o no de infraestructura avejentada requiere de un análisis económico-financiero muy cuidadoso. El método de costo-beneficio puede proporcionar elementos muy valiosos en la decisión, sobre todo si se trata de optimizar la decisión en el largo plazo **(Kim, 2019; Kim et al, 2024)**. Más particularmente, el análisis de costo – beneficio puede ser de gran utilidad para orientar la decisión de reemplazar o no tuberías de conducción.

La ecuación (2.10), basada en **Kim et al (2019)**, representa el cálculo de los beneficios y los costos.

$$BC = \sum_{t=1}^T \frac{(B_r(t) + B_1(t) + B_c(t) + B_i(t))}{(1+r)^t} / \sum_{t=1}^T \frac{C_r(t)}{(1+r)^t} \quad (2.10)$$

Donde:

BC es el radio beneficio-costos

t es el año de análisis

r es la tasa de descuento real

$B_r(t)$ es el beneficio derivado de la reducción en los costos de reparación ante la falla de la tubería en el año t (USD/año)

$B_1(t)$ es un beneficio asociado con los costos que se tendrían que enfrentar por los cortes de agua (USD/año)

$B_c(t)$ es el beneficio asociado con los costos derivados de los daños causados por las interrupciones del uso comercial (USD/año)

$B_i(t)$ es el beneficio asociado con los costos derivados de los daños para el uso industrial

$C_r(t)$ es el costo de renovación en el año t (USD/año)

Lo anterior indica el grado de daños que se presentan en la falla de una tubería, calculando subsecuentemente los beneficios asociados con la reducción de los accidentes de falla debido a la renovación. Es decir, debido a la renovación se tienen beneficios con la reducción de los incidentes de falla. Como se puede esperar, al no renovarse las tuberías

deterioradas habrá daños originados por las fallas con afectaciones a la población y a las actividades económicas.

Por su parte, los costos de renovación se expresan por la ecuación 2.11:

$$C_r(t) = \sum_{m=1}^M C_{rm}(t, m) = \sum_{m=1}^M \left[UC(m) \cdot L(m) \cdot \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (2.11)$$

Donde:

$C_r(t)$ es el costo de renovación en el año t (USD/y)

$C_{rm}(t, m)$ es el costo de renovación de la tubería m en el año t (USD/y)

m es la tubería objetivo ($m = 1, 2, \dots, M$)

$UC(m)$ es el costo unitario de renovación de la tubería m (USD/y)

$L(m)$ es la longitud de la tubería m

t es el año de análisis ($t = 1, 2, \dots, T$)

r es la tasa de descuento real. En el proyecto que se analiza es de 0.045

El concepto del ciclo de vida de los proyectos es muy valioso para orientar el análisis de los modelos, las métricas y la información sobre el envejecimiento de la infraestructura. Las ecuaciones (2.12)-(2.14) permiten estimar los costos del ciclo de vida para el total de la red

Minimizar:

$$LCC = \sum_{t=1}^T [C_r(t) + C_o(t)] \quad (2.12)$$

$$C_r(t) = \sum_{m=1}^M C_{rm}(t, m) = \sum_{m=1}^M \left[UC(m) \cdot L(m) \cdot \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (2.13)$$

$$C_o(t) = \sum_{m=1}^M C_{om}(t, m) = \sum_{m=1}^M \left[FR_m(t, m) \cdot L(m) \cdot RC(m) \cdot ICF \cdot \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (2.14)$$

Donde:

LCC representa el costo del ciclo de vida de la red

$C_r(t)$ es el costo de renovación en al año t (USD/año)

$C_o(t)$ es el costo de operación y mantenimiento en el año t (USD/año)

$C_{rm}(t, m)$ es el costo de renovación de la tubería m en al año t (USD/año)

m es la tubería objetivo ($m=1,2,\dots,M$)

$UC(m)$ es el costo de renovación unitario de la tubería objetivo (USD/m)

$L(m)$ es la longitud de la tubería m

t es el año de análisis ($t = 1, 2, \dots, T$)

r es la tasa de descuento real

$C_{om}(t, m)$ es el costo de operación y mantenimiento de la tubería m en el año t ($t=1,2,\dots,T$) (USD/año)

$FR_m(t, m)$ es la tasa de falla de la tubería m en el año t (falla/km-año)

$RC(m)$ es el costo de reparación de la tubería (USD/falla)

ICF es el factor de costo indirecto (en este estudio = 3.0)

Un plan de renovación óptima, como se determina en la programación dinámica, se define como un plan orientado a minimizar los costos del ciclo de vida de la red de distribución. En este sentido es muy importante señalar que los costos de planeación, y diseño de las obras se consideran significativamente menores que los costos de operación y mantenimiento.

Índice del valor de la infraestructura

Un indicador muy importante para la determinación de los costos del remplazo es el índice del valor de la infraestructura (IVI, por sus siglas en inglés), propuesto por **Alegre & Coelho 2013**). El IVI, expresado en la ecuación (2.15) y que varía de 0 a 1, ayuda a diseñar una estrategia orientada a la gestión de activos. En esta ecuación, la vida útil esperada se define como el periodo de inicio hasta que el SF alcanza 1.0. El periodo remanente del punto actual hasta que el SF llega a 1.0 se calcula como el residual de la vida útil. Posteriormente se hace una comparación entre el promedio del periodo de 40 años para el SF y la probabilidad de falla de la red. Al final se estima la inversión total sobre el periodo para encontrar la opción más costo-efectiva.

$$IVI(t) = \frac{\sum_{m=1}^M rc_{m,t} \cdot rul_{m,t} / eul_m}{\sum_{m=1}^M rc_{m,t}} \quad (2.15)$$

Donde

IVI (t) es el índice del valor de la infraestructura en el año t (%)

m es la tubería objetivo ($m = 1, 2, \dots, M$)

t es el año de análisis ($t = 1, 2, \dots, T$),

$rc_{m,t}$ es el costo de renovación de la tubería m en al año t (USD/año)

$rul_{m,t}$ es el residual de la vida útil de la tubería m en el año t

eul_m es la vida útil esperada de la tubería m (y)

El estudio de **Kim et al (2024)** establece cinco escenarios para comparar los métodos ya descritos sobre renovación de la infraestructura con otros métodos. Estos escenarios van desde la opción de no hacer nada (A) hasta el reemplazo de las tuberías usando el modelo de optimización (E). Un escenario que comúnmente se usa (B), y para el cual la edad de las tuberías es esencial, es el reemplazo de aquellas con 30 años. El escenario D es aquel

para el cual el radio Beneficio Costo alcanza su máximo valor. El escenario C es aquel en el que las tuberías se reemplazan cuando el factor SF es menor que 1.0.¹⁴

Estos autores aplican el marco conceptual ya abordado sobre la optimización de inversiones para renovar infraestructura de conducción a un caso de estudio. Se seleccionó el acueducto KJ en Corea, debido al alto porcentaje de tuberías avejentadas (33% excediendo 30 años de servicio) y una historia significativa de fallas. Se pudo recolectar y ensamblar una base de datos comprensiva que involucró información sobre los años de instalación, el tipo de material y su diámetro, la historia de fallas, la extensión del acueducto, y el suministro de agua. Además de lo anterior, también se consideraron las condiciones ambientales que afectan el desempeño de las tuberías, entre las que se tienen el tipo de suelo, la calidad del agua, y la topografía. Esta base de datos fue fundamental para estimar el factor de seguridad (SF) y el modelo de beneficio costo (BC).

Se presentan a continuación los principales elementos de esta base de datos:

- | | |
|---|--|
| • Años de instalación | 1972-2001 |
| • Materiales de las tuberías y su diámetro | SP: 600-1,000 mm; DIP: 500 mm |
| • Registro histórico de fallas (de 1980 a 2021) | SP: 32 fallas; DIP: 32 fallas |
| • Longitud del acueducto | SP: 70 km; DIP: 32 km |
| • Suministro de agua: | Aproximadamente 70,000 m ³ /d |

Con esta base de datos se construyeron los escenarios (A) a (E), ya mencionados, para estimar los costos de renovación y el desempeño esperado para el periodo 2023-2062; es decir, un lapso de 40 años. Además de los costos se estima el cambio del IVI. Para cada escenario, se calcula:

- Costos totales para el periodo de 40 años
- Promedio anual del factor de seguridad (SF)
- Promedio anual de la tasa de fallas (falla/km-año)
- Promedio anual del IVI
- IVI al punto final
- Cambios del IVI en el punto de inicio y final

No sorprende que el escenario A (*do nothing*) es el más costoso, con cifras de 80 millones de dólares. En la ausencia de inversiones para la renovación se incrementan los incidentes de falla y los costos de reparación. Dicho de otra forma, ignorar la renovación de infraestructura avejentada incrementa los costos en el largo plazo y se expone a los organismos y agencias de agua a riesgos operacionales. Lo anterior afecta a la población, la economía y el ambiente.

En el otro extremo el escenario E, el cual se basa en el modelo de optimación, es el más balanceado y sostenible en el largo plazo. En este escenario se reparten las inversiones durante todo el periodo, asegurando que se mantiene alta seguridad estructural y el valor

¹⁴Este factor de seguridad se calcula como se muestra abajo.

$$SF = \frac{\sigma_{strength}}{\sigma_{stress}}$$

$\sigma_{strength}$ representa la fuerza o fortaleza residual de la tubería (N/m²), σ_{stress} indica la carga que se aplica y actúa sobre la tubería (N/m²)

de los activos, además de minimizar los riesgos en la red de conducción. Si bien los escenarios B, C y D mitigan los costos de mantenimiento al reducir la frecuencia y seguridad de las fallas, también presentan notables concentraciones de presupuesto en años específicos. Ello puede significar altos desembolsos para reemplazos a gran escala, lo cual presiona las finanzas de las agencias del agua.

Lo anterior pudiera representar un patrón irregular de asignación presupuestal y un reto para la eficiencia y planeación financiera. Vale la pena concluir que todos los escenarios B a E son preferibles al escenario A, en el cual se abandona la red ante los costos de mantenimiento. Al final del día, como se demuestra, esta no es una buena opción para la eficiencia y sostenibilidad financiera de largo plazo. Esta aplicación mantiene profundas implicaciones para México, especialmente en términos de la disponibilidad de información pues no parece que el país cuente con ella para construir escenarios como los que se presentan en este caso de estudio.

2.4 Comentarios concluyentes

La revisión de la literatura fue muy importante para la construcción de un marco analítico en torno a los principales asuntos asociados con el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y las métricas relacionadas. Esta revisión ayudó a orientar el diseño metodológico de esta investigación. La expresión más directa se refleja en los capítulos 4 y 5, donde se aplica el **factor de envejecimiento** de sistemas de infraestructura seleccionados, tanto en la escala nacional como de las tres grandes metrópolis del país. Se sabe, sin embargo, que este indicador se tiene que analizar en contexto. Tanto la edad de servicio como la vida útil, variables con las que se construye el indicador, son de carácter multifactorial. En este sentido, si bien el envejecimiento de la infraestructura puede conducir a problemas en su funcionamiento, la edad no es la única variable.

No es gratuito subrayar las complejidades detrás del proceso de envejecimiento y de la naturaleza multifactorial de estas dos variables. Los conceptos de fin de vida útil funcional y técnica ilustran muy bien lo anterior. El tema del mantenimiento es muy relevante pues puede retrasar o adelantar este proceso. Estos modelos más complejos son útiles para optimizar la decisión de cuándo rehabilitar o reemplazar activos de infraestructura, solo que requieren de información que actualmente no está disponible en México. En este sentido, el juicio de los expertos se puede constituir en una vía muy útil para apoyar esta decisión, por supuesto en el marco de las restricciones financieras existentes. Este conocimiento ayuda a orientar el marco metodológico que se presenta en el capítulo 3.

Habiendo hecho estas consideraciones, también se reconoce que la mayoría de los enfoques y modelos sobre el tema – de los más sencillo a los más sofisticados - requieren **la edad** como variable esencial. En este sentido, se confirma lo atinado que fue seleccionar el tema del envejecimiento de la infraestructura para llevar a cabo esta investigación. Esto es congruente con las orientaciones de la IWA sobre los requisitos asociados con un buen indicador.

Esta revisión de la literatura es clara en señalar la relación entre infraestructura envejecida y las fugas, así como el reconocimiento de que la desatención de estas va a significar

presiones sobre la oferta de agua. Esto significa que la gestión del agua urbana tiene que considerar la oferta y la demanda en conjunto. Para México este tema es y debe ser de la mayor relevancia y, de algún modo tendrá que encontrar los recursos para su atención.

Esto conduce necesariamente a la discusión del contexto financiero. La infraestructura y su financiamiento son centrales para el crecimiento y el desarrollo (**Spence, 2009**); su conservación es esencial para la prestación de servicios de calidad. Esta esencialidad de las inversiones en infraestructura no se ve reflejada enteramente en su financiamiento y presupuesto. Se tienen profundas brechas para financiar esta infraestructura económica (**Woetzel et al, 2017**); **Doumbia y Lauridsen, 2019**), en un contexto que exige mayor efectividad y eficiencia de las inversiones. Los retos derivados de esta situación se magnifican a la luz del cambio climático, pues el acento ahora es también la inclusión de infraestructura resiliente al clima. Este aprendizaje sirve de puente para la realización de los capítulos 6 y 7, centrados sobre estos temas.

3

Marco Metodológico

La construcción de este marco conceptual se apoya en la revisión de la literatura realizada en el capítulo 2. El análisis permitió contar con una riqueza de conceptos que sirvieron de guía para darle sentido y rumbo a la investigación. Para este proyecto es muy importante el reconocimiento de que la infraestructura hidráulica es esencial para el desarrollo y que su inadecuada provisión tiene un impacto negativo en la economía y la sociedad. Esto permite entender que **la calidad** de su disponibilidad – la cual incluye la edad - se traduce en servicios de agua y saneamiento también de calidad. El enfoque sistémico implica que no hay un solo sistema de infraestructura sino más bien sistemas interdependientes. Infraestructura integrada fue un concepto de gran ayuda para la metodología empleada en este proyecto.

La selección del indicador para medir el envejecimiento de la infraestructura fue posible gracias a un análisis cuidadoso de los marcos, modelos y métricas que se presentan en la literatura nacional e internacional. Como se expresa en el capítulo, a menudo el problema con la medición no son los datos sino los marcos de análisis y su interpretación en contexto.

Una tarea imprescindible fue estudiar las fuentes de información y datos disponibles. Consultar las fuentes de INEGI y CONAGUA era una tarea obligada. También se consultaron otras fuentes relevantes al caso, como el IMTA, el IMCO, y los portales de organismos operadores seleccionados. Lo anterior se complementó con sistemas de información internacionales como OLAS, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo. El capítulo muestra los alcances y limitaciones en torno a las fuentes y los datos sobre el tema en el que se centra esta investigación.

El análisis de la literatura nacional e internacional, los seminarios con expertos y responsables de los organismos de agua de las tres metrópolis, las consultas especializadas y la conferencia del 20 de noviembre de 2025, fueron insumos muy importantes para orientar la investigación, dar sentido a los hallazgos y entender un poco más las grandes complejidades asociadas con el tema de la investigación. Desde la propuesta inicial para este proyecto de investigación, siempre se pensó que los seminarios y la conferencia serían piezas clave para llevar a buen puerto este proyecto. Gracias a lo anterior se pudo contar con información de primera mano que, de otra forma, no se habría podido tener. En el resumen ejecutivo ya se detallaron los alcances de estos eventos.

3.1 Breve marco conceptual

De valor para este trabajo es la conceptualización que se usa en el reporte de *Estadísticas del Agua en México 2021*, al referirse al sistema económico y del agua (**CONAGUA, 2021**, p. 94). Desde esta perspectiva Economía se entiende como el sistema de usuarios que extrae agua con fines de producción y consumo y que para esos fines desarrolla infraestructura para almacenamiento, tratamiento, distribución y descarga del agua.

La mayoría de los temas de infraestructura hidráulica analizados en este proyecto guardan correspondencia con esta definición. Esta publicación contiene un capítulo específico sobre lo que constituye esta infraestructura, mismo que ha servido de referencia para este trabajo: Presas de almacenamiento; acueductos; plantas potabilizadoras; plantas de tratamiento de aguas residuales; y protección contra inundaciones.

En gran medida estas infraestructuras se asocian con el ciclo hidrológico, toda vez que a través de ellas se permite captar, conducir, potabilizar, consumir, tratar y desalojar el agua. El enfoque de la infraestructura integrada guarda correspondencia con este ciclo, y también con los servicios de agua y saneamiento que se ofrecen. Desde la perspectiva latinoamericana, la integralidad de los proyectos de infraestructura sostenible incluye cuatro dimensiones: sostenibilidad económica y financiera, sostenibilidad ambiental y resiliencia climática, sostenibilidad social y sostenibilidad institucional (**Juárez del Ángel, 2024**). En este enfoque, tal como se señala en el informe bandera del BID 2020, el foco de la nueva visión de la infraestructura debería estar en los servicios y no solo en la construcción de activos (**Cavallo et al, 2020**). De relevancia para este proyecto es el reconocimiento de que al final del día, las coberturas de agua potable, alcantarillado y saneamiento reflejan, en muchos sentidos, el estado o desempeño de infraestructuras asociadas (**Prud'homme, 2005**).

Como bien lo expresara desde hace más de 20 años el informe de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo sobre la medición del desarrollo sostenible (**OECD, 2000**), a menudo el problema no son los datos sino los marcos de análisis. En este sentido, los datos seleccionados deberían estar en función del marco analítico construido exprofeso, además de que necesitan ser interpretados en contexto. Es por ello que en el capítulo 2, antes de pasar propiamente a los modelos y métricas sobre la edad y el envejecimiento de la infraestructura, se le dedicó atención a este importante asunto de los marcos de análisis.

3.1.1 Marcos para analizar el estado de la Infraestructura

La literatura analizada muestra varios marcos y métricas para valorar el estado de la infraestructura, que van desde relaciones muy sencillas sobre su deterioro a modelos más sofisticados que predicen la probabilidad de falla de una infraestructura. También se tienen categorizaciones sobre la calidad de la infraestructura, como es el caso japonés y el reporte que publica la Sociedad American de Ingenieros Civiles (ASCE, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos. Una variable que aparece consistentemente en prácticamente todas las métricas es la edad de la infraestructura. El mantenimiento es un tema que también se refiere sistemáticamente en el análisis del deterioro de la infraestructura.

3.1.2 Requisitos de una buena métrica

De conformidad con las guías de la IWA revisadas en el capítulo 2, una cuestión muy importante en la definición de una métrica sobre la obsolescencia de infraestructura – lo cual constituye una contribución central de este proyecto - es que el o los indicadores deben apegarse a criterios claramente establecidos y que hagan sentido. Es así que centrarse sobre la edad de servicio en relación con la vida útil es una selección adecuada. Por supuesto, por lo ya explicado anteriormente, se entiende el envejecimiento no es sinónimo de obsolescencia; aunque también se sabe que parte de las infraestructuras tanto a nivel internacional como de México han rebasado ya su vida útil y tendrían que ser rehabilitadas y eventualmente reemplazadas. Más particularmente, las fugas tienden a reflejar el envejecimiento de la infraestructura.

La recomendación sobre la universalidad en el uso del indicador es especialmente relevante para los propósitos de esta investigación. La **edad** de la infraestructura se considera como variable esencial tanto en métricas muy sencillas hasta modelos más complejos que estiman la probabilidad de falla de una infraestructura o la optimización de su reemplazo. Es por todo lo anterior que en este trabajo se propone la construcción del factor de envejecimiento (FE), como acercamiento relativo a la obsolescencia de la infraestructura. (**Ecuación 3.1**). Con base en ello, este capítulo se centra en la documentación y análisis del FE para los diferentes sistemas de infraestructura hidráulica considerados.

Como se estudió en el capítulo 2, si bien este es un buen indicador y generalmente señala la existencia de algún tipo de problema con el funcionamiento de la infraestructura, se tiene que analizar en contexto. Tanto la edad de servicio como la vida útil son de carácter multifactorial. Estas dependen de muchos factores, y la edad – aunque da muchas pistas - no necesariamente muestra que la infraestructura está obsoleta. El factor de envejecimiento se calcula asumiendo que la infraestructura no ha sido mejorada o sustituida, lo cual no necesariamente es el caso. Los datos sobre el mantenimiento, rehabilitación o reemplazo es de gran utilidad para saber más informadamente sobre el envejecimiento y posible obsolescencia de los sistemas de infraestructura o de algunos de sus componentes.

$$\text{Factor de Envejecimiento} = \frac{\text{Edad de servicio (años)}}{\text{Vida útil de diseño (años)}} \quad (3.1)$$

3.2 Metodología seguida

Las obras de infraestructura permiten almacenar, conducir, potabilizar, distribuir y tratar el agua para un uso seguro. Para ello se utiliza como marco lo que se conoce como infraestructura integrada o sistémica. Es muy importante notar el énfasis en el concepto de sistema, para enviar de entrada el mensaje de que los componentes de infraestructura – como presas o acueductos son sistemas y que tienen interrelación con otros sistemas. De tal forma que se podría hablar de un sistema de sistemas. Para este proyecto la infraestructura integrada abarca los siguientes sistemas.

- Redes climatológicas
- Redes hidrométricas
- Presas
- Acueductos
- Redes de distribución de agua y de alcantarillado sanitario
- Plantas potabilizadoras y de tratamiento

La investigación se llevó a cabo en dos escalas: una nacional y otra con enfoque en las tres metrópolis del país (CDMX, Monterrey, Guadalajara). El trabajo se apoyó en las siguientes tareas:

- Revisión de literatura especializada académica y de organizaciones internacionales, plataformas y bases de datos
- Análisis del inventario de infraestructura hidráulica
- Seminarios-taller especializados sobre envejecimiento/obsolescencia de infraestructura (como insumo para el desarrollo del proyecto). Se llevaron a cabo dos seminarios en Monterrey (16 y 26 de junio 2025) y otros en Ciudad de México (7 de julio) y Guadalajara (13 de octubre). El rango de experiencia de los participantes va de los dos a 45 años
- Entrevistas con actores clave (nacional y metropolitano)
- Reunión de trabajo con INEGI en Aguascalientes (el 12 de noviembre de 2025, cuyos detalles se han referido en el Anexo RE.3)

Apoyarse en el juicio de los expertos fue una premisa central para esta investigación. Es por ello que se llevaron a cabo cuatro seminarios especializados en Monterrey (2), Ciudad de México y Guadalajara, así como entrevistas con técnicos con mucha experiencia (Anexo RE.1). Esta premisa también orientó el programa científico de la conferencia *Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. México y perspectivas internacionales*, llevada a cabo en el Campus Monterrey del Tecnológico, el 20 de noviembre de 2025, cuyo reporte se incluye en el anexo RE.2.

Entre las revistas internacionales consultadas vía la base de publicaciones **Scopus** están las siguientes: *AQUA- Water Infrastructure, Ecosystems and Society; Journal of Hydroinformatics; Journal of Infrastructure Systems; Journal of Water and Climate Change; Water Resources Planning Management; and Water Supply*. Entre las revistas mexicanas del ámbito profesional se consultaron varios años de las siguientes: Ingeniería Civil, H2O, Tecnología y Ciencias del Agua, y Tláloc.

3.3 Fuentes y datos sobre infraestructura hidráulica

3.3.1 INEGI

Portal Cuéntame

Si bien parece que este portal está orientado al público en general que muestra interés en los temas del territorio mexicano, especialmente el infantil y juvenil, contiene algunos datos importantes, aunque desactualizados sobre infraestructura hidráulica. Esta sección se consultó en abril de 2025 mediante la ruta mostrada, a fin de llegar al tema del agua, y particularmente el de la infraestructura. El usuario encuentra datos sobre las presas de México. Se menciona que, a 2021, existían alrededor de 6500 presas y cerca de 150,000 hm³ de almacenamiento. Se presenta además un mapa con las 29 presas más importantes. A esta fecha, como se muestra en el capítulo 4, CONAGUA tiene información más amplia y actualizada. Esta es la dirección del portal:

https://cuentame.inegi.org.mx/descubre/geografia/rios_y_lagos/

Censos de Población y Vivienda 2020

Los Censos de Población y Vivienda son una aportación esencial del INEGI para entender a México y su realidad socioeconómica. La información de los censos es ampliamente utilizada por las entidades gubernamentales, privadas y sociales, dentro y fuera del país. El Censo reporta información en torno a la disponibilidad de agua entubada y de drenaje (INEGI, 2022, pp. 159-160). En el primer caso, el Censo 2020 contiene el número de viviendas particulares habitadas que disponen de agua entubada dentro de la vivienda o en el patio o terreno, ubicando esta disponibilidad en 96.3% (12 puntos por arriba en relación con el año 2000). En el segundo caso se brindan datos sobre la disponibilidad de drenaje sanitario, especificando si las viviendas usan sanitarios o letrinas; o si no disponen de drenaje alguno. La cobertura de drenaje se estima en 95.5% (un aumento de 17 puntos sobre el nivel del año 2000). En otra presentación del Censo coinciden los datos para la cobertura de agua, pero la de drenaje tiene una estimación más alta (98%).

Una limitación del Censo, sin embargo, es que no se mide la disponibilidad real de agua en los hogares, más allá de la conexión física a agua entubada. No hay información sobre la frecuencia del acceso ni de la calidad del agua que se dispone en las viviendas. Sobre el primer punto, la Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares (ENIGH), referida en el siguiente apartado, también levantada por el Instituto, sí contiene frecuencia de acceso (en días, aunque no contiene datos sobre la calidad del agua). La ENIGH muestra que solo el 66% de la población tiene acceso diario a agua potable. Se trata de 30 puntos porcentuales menos. En lo que respecta a edad o calidad de la infraestructura, el Censo no proporciona información. Es importante considerar la calidad de los servicios de agua y saneamiento porque, como se argumentó en el capítulo 2, al analizar el informe bandera del BID 2020 (Cavallo et al., 2020), la calidad de estos servicios refleja la calidad de la infraestructura que los proporciona.

Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares 2024 (<https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2024/>)

La Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares se ha convertido en un referente obligado para el análisis socioeconómico en México, y mantiene profundas implicaciones de política pública. La ENIGH más reciente se levantó entre el 21 de agosto y el 28 de noviembre de 2024 (**INEGI, 2025a**). De hecho, la ENIGH es de las pocas fuentes oficiales que proporcionan información sobre la frecuencia (diaria o no) de la disponibilidad de agua. Incluir la frecuencia de disponibilidad debería ser un dato obligado también para todas las fuentes de datos que tiene CONAGUA y otras fuentes afines. Por muchos años, esta información fue esencial para las mediciones que hacía el CONEVAL en torno a la pobreza. Por ejemplo, en Indicadores Complementarios 2010-2018 de la Vivienda, se utilizó la variable Frecuencia del Abastecimiento del Agua. Esto se realizó usando el entonces Módulo de Condiciones Socioeconómicas (derivado de la ENIGH). Como es sabido, el CONEVAL fue desaparecido y estas tareas sustanciales fueron transferidas al INEGI. En este sentido, el Instituto se hizo de mayores responsabilidades en este importante tema social y, por añadidura, su relación con el agua.

De especial valía son los tabulados de hogares y vivienda. Los tabulados 1.11 y 1.12 se refieren a la disponibilidad de agua. El primero contiene el número de viviendas por entidad federativa según disponibilidad dentro o fuera de la vivienda pero dentro del terreno; o si esta disponibilidad incluye agua entubada de llave pública o hidrante, acceso al agua a través de captadores de lluvia, agua entubada que se acarea de otra vivienda, agua de pipa, y agua de un pozo, río, lago, arroyo u otra fuente. El segundo particulariza la frecuencia (en días) de la disponibilidad, según si ésta es diaria, cada tercer día u otra frecuencia (dos veces por semana, una vez por semana y de vez en cuando). Los tabulados 1.13 a 1.17 presentan la disponibilidad cuantitativa y cualitativa del drenaje.

Censos Económicos 2024 (<https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>)

El caso de los Censos Económicos es muy particular pues éstos contienen información muy valiosa sobre los organismos operadores que, sorprendentemente, no es usual que se conozca en el sector agua. Al igual que en muchas otras fuentes de información, se tiene un problema estructural y entendible sobre el rezago de los datos y que se usa una escala de entidad federativa. El censo más reciente es de 2024 (con datos de 2023). El Censo proporciona una gran riqueza de información sobre la infraestructura, la economía y las finanzas, que no es común encontrar en otras fuentes (**INEGI, 2025b**). Hay datos muy ricos sobre la captación, el suministro y el tratamiento del agua. Sin embargo, dentro de la enorme variedad de datos que se generan y divulgan sobre los organismos operadores, hay una ausencia muy marcada de información sobre el estado de la infraestructura hidráulica, de su deterioro y de su mantenimiento.

La Encuesta Nacional de Calidad Gubernamental (ENCIG) tiene como propósito conocer las experiencias y percepción de la población con trámites y servicios públicos proporcionados por los diferentes niveles de gobierno (INEGI, 2024). La encuesta se aplica a personas de 18 años y más en ciudades con al menos 100 mil habitantes, para saber el grado de satisfacción con los servicios que se reciben. A nivel nacional, esta satisfacción fue del 37.2% en el caso del agua potable y de 58.4% para el drenaje y alcantarillado. La ENCIG proporciona datos agregados a nivel de entidad federativa. La satisfacción con el servicio de agua potable para Ciudad de México, Jalisco y Nuevo León, por ejemplo, son (en %) de 54.2, 48.3 y 37.2, respectivamente. En el caso de drenaje y alcantarillado las cifras son, en el mismo orden, de 46.3, 48.8, y 58.4. Lo anterior sugiere una baja satisfacción con los servicios de agua.

Si bien los datos se presentan a nivel estado, es de suponer cierta asociación con las metrópolis estudiadas en el capítulo 5. También en relación con esta investigación es que, en el caso del agua, tres variables conforman el índice de satisfacción: suministro constante de agua, potabilidad y desperdicio por fugas. Estas tres variables guardan cercana correspondencia con la calidad de la infraestructura, particularmente, como se analizó en el capítulo 2, con su envejecimiento. Al igual que en el caso de la ENIGH, la ENCIG parece ser poco conocida en el ámbito de las entidades y los profesionales del agua.

3.3.2 CONAGUA

La Comisión Nacional del Agua es la institución que, por su propia naturaleza, genera y publica más información en el tema del agua en general y de infraestructura hidráulica en particular. Parte de esta información es estratégica para el país, como la que produce el Servicio Meteorológico Nacional, o la publicación diaria del almacenamiento de las presas. La Comisión también genera publicaciones de referencia, como por ejemplo las *Estadísticas del Agua en México* y el *reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Además de estas tareas la CONAGUA tiene muy importantes funciones en la autorización de nuevos aprovechamientos y del registro público de usuarios del agua. Se analiza aquí la información del Portal de Sistemas de Información del Agua, y del Sistema Nacional de Información del Agua, en los cuales se encuentra información de utilidad y las ligas a las dos publicaciones insignia ya referidas.

El Anexo 3 presenta un concentrado de las fuentes, ligas de acceso, descripción, y comentarios sobre el acceso a los subsistemas de información. Las tablas se compilaron como apoyo a todos aquellos interesados en el tema que estudia este proyecto. Se han sintetizado las fuentes de información disponibles para cada subsistema, desde las estaciones de monitoreo climatológico e hidrométrico hasta las plantas de tratamiento de aguas residuales. Se incluyen las ligas a los espacios de interés en Internet, así como una descripción general de lo que contiene cada repositorio. Además, se han adicionado comentarios que resultan valiosos al usuario puesto que indican que sí es posible encontrar

en los portales y que no es posible obtener. En lo general, todas las fuentes son confiables pues la mayoría están ligadas a espacios oficiales. Lo anterior lleva a subrayar los esfuerzos que se han realizado en el país para contar con información útil de los sistemas hídricos en los portales públicos.

Sin embargo, también existen áreas de oportunidad, que al ser resueltas podrían conducir a procesos más eficientes, necesarios para la realización de estudios y proyectos más efectivos y oportunos. Por ejemplo, se destaca la dificultad de obtener información homologada y actualizada. Por otra parte, se encuentra información del mismo tema en portales distintos, lo que puede causar confusiones. De hecho, en los casos de las estaciones climatológicas e hidrométricas se tienen incluso diferencias en la nomenclatura de los archivos. En varios casos hay interfases poco amigables que retrasan el acceso y consulta de la información. Los procesos de adquisición de los archivos de datos son complicados, en ocasiones con información desactualizada e incompleta, o en formatos que dificultan su uso. Para los fines de este estudio, la información de la edad de la infraestructura o la fecha de su puesta en marcha es prácticamente inexistente.

Portal de Sistemas de Información del Agua

En el pasado reciente la CONAGUA construyó un nuevo portal con la intención de concentrar en un solo espacio el acceso a varios de sus sistemas y portales que contienen información sobre los recursos hídricos del país. Este acceso a lo que se llama Portal de Sistemas de Información del Agua (PSIA, acrónimo dado por los autores de este trabajo), opera desde el 1 de marzo de 2021 y se puede acceder desde la liga [Portal de Sistemas de Información del Agua Conagua](#). Sin duda que este esfuerzo representa un avance muy importante para agilizar la consulta sobre información y datos en torno al agua.

Sin embargo, un análisis detallado de los contenidos temáticos en el portal también muestra áreas de oportunidad en relación con el uso de algunos de los sistemas de información de la Comisión. Este es el caso del Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), el cual está contenido en el portal. El nombre de este sistema de información sobre agua conlleva en el nombre el carácter de nacional. Si bien hay contenidos muy relevantes, su cobertura es más limitada que el PSIA. Por otra parte, el SINA tiene un espacio para consultar publicaciones relevantes de la CONAGUA, incluidas las dos ya mencionadas, mientras que el PSIA no contiene un rubro sobre publicaciones. Se demuestra en esta contribución que la efectividad y eficiencia en el acceso a fuentes de información en agua en general y de infraestructura hidráulica en particular depende de cuál es *la puerta* de acceso. También se encuentra la necesidad de sistematizar la información temática presentada, independientemente de la plataforma de acceso, para evitar, donde sea pertinente, duplicidades o inconsistencias en la forma en que se presenta la información.

Entre los sistemas de información que integra el PSIA, y con relevancia directa e indirecta a la medición de infraestructura están los siguientes, algunos de los cuales tienen su propio portal o se puede llegar a ellos a través de este portal marco. En este trabajo se detallan parte de estos sistemas.

- Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)
- Consultas al Registro Público de Derechos del Agua (REPDa)
- Precipitación acumulada mensual
- Sistema Meteorológico Nacional (SMN)
- Sistema de Información Hidrológica (SIH)
- Aguas Subterráneas
- Calidad del Agua
- Inventario Nacional de Humedales
- Monitoreo de Presas
- Sistema de Seguridad de Presas
- Personal acreditado para realizar visitas de inspección
- Sistema de Información Geográfica de Acuíferos (SIGACUA)
- Programas Federales de Agua Potable y Saneamiento (PROAGUA)
- Sistema Nacional de Tarifas de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
- Sistema de Información sobre Riesgos
- Banco Nacional de Datos sobre Aguas Superficiales (BANDAS)
- Archivo Histórico y Biblioteca Central de Agua
- Programa de Apoyo a la Infraestructura Hidroagrícola S217
- Sistemas de lecturas MEDUSA
- LocREPDa (Localizador de Aprovechamientos del REPDa)

Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)

El Sistema Nacional de Información del Agua (SINA), mismo que está dentro del Portal de Sistemas de Información del Agua y disponible a través de la liga <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/>, contiene información valiosa sobre diversos temas e indicadores en torno al agua, y más particularmente sobre infraestructura. El SINA estructura esta información alrededor de seis dimensiones: (1) contexto geográfico y socioeconómico, (2) Situación de los recursos hídricos, (3) usos del agua, (4) infraestructura hidráulica, (5) instrumentos de gestión del agua, (6) agua, salud y medio ambiente. Más específicamente en el apartado sobre infraestructura hidráulica, el Sistema incluye los siguientes apartados: monitoreo de presas, distritos de riego, sistema Cutzamala, programa K111, declaratorias de fenómenos hidrometeorológicos, plantas potabilizadoras, coberturas de agua potable y alcantarillado, plantas de tratamiento de aguas residuales, distritos de temporal tecnificado, unidades de riego, obras de protección contra inundaciones, CRAE y PROCAPTAR. En todos los casos, el sistema se liga a un entorno georreferenciado en el cual se puede obtener mucha más información que la mencionada.

Para el caso del programa K111 que es el programa presupuestario para la rehabilitación y modernización de presas y obras de cabeza, el SINA proporciona información de las presas rehabilitadas para 2019, 2020, 2021 y 2023, mencionando que en 2022 no hubo inversión en el programa K111.¹ La información se encuentra a nivel de ubicación, importe contratado y trabajos realizados. Se consigna que se dio mantenimiento o rehabilitación a 86 obras en 2019, a 86 en 2020, 112 en 2021 y 74 en 2022.

¹ Esto también se señala en el capítulo 6, centrado sobre financiamiento e inversión.

Asimismo, este apartado dentro del SINA proporciona las coberturas de agua potable y alcantarillado e información de los 80 principales acueductos desde 1990 hasta 2020 en intervalos de cinco años. Por lo que respecta a las plantas potabilizadoras, esta sección tiene el inventario en forma continua desde 2017 a 2023. Los metadatos incluyen capacidad instalada y caudal potabilizado por región hidrológica administrativa (RHA), además de los procesos de potabilización aplicados.

En cuanto a plantas de tratamiento de aguas residuales, la información es similar en cuanto al periodo de reporte. Los metadatos incluyen número de plantas por RHA así como la capacidad instalada y el caudal tratado. Se incluyen datos de las descargas tanto municipales como no municipales (incluyendo a la industria). Asimismo, existe un apartado de PTAR industriales, que muestra los tipos de tratamiento y las plantas en operación por estado para 2020, 2021 y 2023. El último de los temas relacionados más directamente con infraestructura es el de obras de protección. En él se consignan las obras de protección contra inundaciones y las de reconstrucción, pero sin información temporal.

3.3.3 Otras fuentes de información y publicaciones

Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores - IMTA

El Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores (PIGOO), desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), proporciona información de alrededor de 552 organismos operadores de 2002 a 2020 y en algunos casos, muy pocos, hasta 2023). La liga al sitio es <http://www.pigoo.gob.mx/index.jsp>. En general y aunque la base de datos es muy porosa (con muchos datos y variables faltantes), se incluyen hasta 68 indicadores, agrupados en cuatro categorías: infraestructura, operación, financieros, y de eficiencia. Desde un principio el PIGOO aclara los alcances de estos indicadores. Se enfatiza que la veracidad de éstos depende de la información proporcionada por los organismos operadores de agua potable, alcantarillado y saneamiento (OOAPS) participantes. En este sentido, la confiabilidad de la información es responsabilidad absoluta de los organismos.

Indudablemente que estos indicadores brindan información de utilidad para el país. En referencia al tema del estudio, infraestructura, se incluyen por ejemplo número de tomas, tamaño de la red, rehabilitación y mantenimiento, y elementos para el cálculo del porcentaje de agua no contabilizada (ANC). También está por ejemplo, el indicador ‘Tomas con Servicio Continuo’, el cual da una mejor idea de la calidad del servicio, a diferencia de solo expresar cobertura como el acceso a una toma de agua, sin que a menudo haya disponibilidad.

Sin embargo, también deben señalarse las limitaciones de los indicadores. Primero, porque al final del día, como ya se mencionó, los OOAPS deciden participar o no en el programa. Esto significa que en realidad los indicadores construidos representan una muestra del mosaico nacional. Por otra parte, se tiene la percepción de que, si bien no se puede generalizar, la información proporcionada no es siempre confiable. No es gratuito el señalamiento del programa, también ya mencionado, sobre la confiabilidad de los datos y la responsabilidad, en este sentido, de los organismos operadores. Por lo mismo, se

entiende que estos indicadores no siempre se encuentran disponibles para el total de los organismos que participan en el Programa, ni tampoco para todos los años de la serie.

Esto se observa claramente al consultar los indicadores de varios organismos. Se entiende que las comparaciones entre organismos se deben realizar con cuidado pues se tienen diferencias geográficas, de diseño institucional y económicas, por ejemplo. Está también la cuestión de la actualidad de los indicadores. En el caso de la Ciudad de México y Guadalajara se tienen datos solo hasta 2020, mientras para Monterrey los hay hasta 2022. También se tiene la percepción de que los organismos reportan información – en cantidad y calidad – según la instancia que la solicita y de acuerdo con lo que se piensa será el uso de ésta.

Instituto Mexicano para la Competitividad

El Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO) se ha constituido como un referente en el análisis y propuestas sobre políticas públicas en México (<https://imco.org.mx/>). Se revisaron tres de sus publicaciones con relevancia para este proyecto de investigación y que al momento de búsqueda de información y datos eran las más recientes:

- Índice de Competitividad Estatal 2025 y 2022
- Índice de Competitividad Urbana 2024 y 2021
- Informe Estatal del Ejercicio del Gasto 2024

Índice de Competitividad Estatal 2025

(<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-estatal-2025/>)

El Índice de Competitividad Estatal 2025 se conforma por seis subíndices. Uno de ellos (el #2) se refiere a la infraestructura, pero el tema del agua está ausente. Se incluyen el sector financiero, de telecomunicaciones y de transporte. En la justificación de incluir este subíndice se expresa, textualmente, lo siguiente: “Estos sectores son necesarios para impulsar el crecimiento económico, la inversión y la generación de empleo al incidir en otros sectores” (p. 4). Dada su contribución al desarrollo económico, social y ambiental, sorprende que el sector agua no sea parte de este subíndice. Agua sí aparece como parte del subíndice Sociedad y Medio Ambiente (#4). El indicador que se utiliza es el caudal tratado de aguas residuales, expresado como el caudal tratado en relación con la población del estado (lts/seg por cada mil habitantes). Los datos para el periodo 2001-2023 son tomados del SINA. Se considera que el IMCO podría fortalecer el tema del agua. Este trabajo puede aportar en esta dirección.

Índice de Competitividad Estatal 2022

(<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-estatal-2022/>)

Es importante analizar la edición 2022 de este índice, ya que contiene un poco más de información en torno al agua, aunque no explícitamente sobre la infraestructura. En esta

edición el índice se compone de diez subíndices; uno de ellos es el manejo sostenible del medio ambiente, referido más sencillamente como Medio Ambiente. De interés para este trabajo, se incluye la definición textual de qué mide este subíndice (p. 14):

“El subíndice de medio ambiente mide la capacidad de los estados para relacionarse de manera sostenible y responsable con sus recursos naturales y su entorno. Se provee información sobre la disponibilidad y administración del agua, el uso eficiente de los recursos, así como el impacto de la contaminación en la salud de los habitantes. Estos elementos inciden directamente sobre la calidad de vida de cada entidad. Por ende, el buen manejo de los recursos naturales y la sustentabilidad podrían tener un efecto considerable en la inversión y la atracción de talento en el mediano y largo plazo”

En relación con el agua, se utilizan dos indicadores (Tabla 2.1, p. 17). El primero es el caudal tratado de aguas residuales (litros por segundo por cada mil habitantes). El segundo se refiere a la eficiencia del agua en la agricultura (miles de pesos por hectómetro cúbico). Sin duda que estos indicadores tienen conexión con lo que se intenta medir en el subíndice, pero no parecen ser suficientes para, por ejemplo, brindar efectivamente información sobre la disponibilidad y administración del agua. En este sentido, sería aconsejable usar el indicador de estrés hídrico o incluso coberturas de agua potable (expresada en frecuencia de disponibilidad y no solamente de acceso a una tubería de agua). El segundo indicador tiene una enorme significancia en la gestión del agua en la agricultura. Mejor aún, sería deseable que en una próxima edición el IMCO considerara el factor de envejecimiento en su subíndice de infraestructura, o por lo menos un indicador derivado de lo que en este proyecto se presenta.

Índice de Competitividad Urbana 2024 y 2021

Se presentan dos ediciones de este índice la más reciente (2024) y la de 2021. Esto obedece a que, como en el caso del índice de competitividad estatal, hay cambios en los contenidos que vale la pena tomar nota, en relación con el agua y la infraestructura.

Índice de Competitividad Urbana 2024

(<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-urbana-2024/#tableros>)

Este índice se conforma por seis subíndices, uno de los cuales es, al igual que en el Índice anterior, Sociedad y Medio Ambiente. Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey aparecen entre las ciudades seleccionadas. Se consideran dos indicadores relacionados con agua. El primero es el consumo de agua por persona, expresado como el consumo en metros cúbicos per cápita. El segundo es la capacidad de tratamiento en operación, considerada como la capacidad instalada de las plantas de tratamiento (en litros/s por cada mil habitantes).

Índice de Competitividad Urbana 2021

(<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-urbana-2021/>)

En esta edición el índice se compone de diez subíndices e incluye, al igual que el índice de competitividad estatal 2022, al medio ambiente. En general, también se comparte el

propósito y utilidad de la medición (p. 13). La construcción de este subíndice requiere de cinco indicadores. Dos de ellos se refieren al agua, repitiéndose el referido al caudal tratado. Se introduce un indicador de consumo (metros cúbicos per cápita). Los comentarios indicados arriba sobre la relativa valía de estos dos indicadores también se sostienen aquí, así como la propuesta de que el IMCO complemente los indicadores utilizados. Un tercer indicador de este subíndice se conoce como desastres naturales, expresado como el número de declaratorias de desastres. Si bien este indicador apunta en la dirección correcta, faltaría incluir información sobre la efectividad de estas declaratorias. En sí mismo, el número no brinda señales de que tan bien (o mal) se gestionan las respuestas a los desastres naturales. Es de notar que en la edición más actualizada (2024) ya no se considera este indicador.

Tanto en este Índice como en el de competitividad estatal, en sus versiones más recientes y en las anteriores que se incluyen como referencia, las propuestas de política pública del IMCO lucen muy limitadas y desconectadas de lo que los mismos indicadores podrían mostrar. Esto representa una avenida de oportunidad, de tal forma que se acerque más visiblemente a lo que los indicadores señalan— a pesar de sus limitaciones para reflejar el objeto de la medición, en este caso sobre medio ambiente y agua — y las propuestas de política pública correspondientes.

Informe Estatal del Ejercicio del Gasto 2024

https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2024/06/DOCUMENTO_IEEG_2024_18Jun24.pdf

Desde el año 2017 el IMCO ha venido publicando este informe, el cual contiene información muy útil sobre las áreas de oportunidad de los estados relacionada con el ejercicio del gasto. Como se expresa textualmente, es importante seguir de cerca las variaciones entre los montos que aprueban los integrantes de los congresos locales en las leyes de ingresos y presupuestos de egresos estatales, y los montos que ejercen las secretarías de finanzas al cierre de cada ejercicio fiscal. Esto cobra mucha relevancia al no existir controles formales ni sanciones que limiten las variaciones que tengan lugar en los estados. Este informe subraya que la actual Ley de Disciplina Financiera de las Entidades Federativas y los Municipios (LDF) no define criterios generales de responsabilidad hacendaria en torno a estas modificaciones. Si bien el reporte no aborda particularmente la infraestructura hidráulica, si tiene conexiones con el tema ya que, como se asienta en el capítulo 6, hay áreas de oportunidad en torno a la fiscalización del gasto en agua. En el capítulo 7, sobre la infraestructura resiliente al clima y su financiamiento, también se menciona que hay incumplimientos de los estados de la LDF, al no prever las partidas necesarias para atender los daños de los huracanes.

Reuniones Nacionales de Infraestructura Hidráulica de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC), 2009-2019

https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/reuniones_nacionales.htm

Durante diez años las reuniones nacionales de infraestructura hidráulica se convirtieron en espacios de discusión, liderados por la Cámara Nacional de la Industria de la Construcción (CMIC), y apoyados (especialmente) por la CONAGUA y otras entidades gubernamentales. En estas reuniones se han presentado análisis y estadísticas sobre diferentes temas de infraestructura hidráulica. Para este trabajo se hizo un análisis exhaustivo de los contenidos de las reuniones 2009, y del periodo 2015 a 2019 (las de los años 2010 a 2014 no se despliegan en el portal de la CMIC). No se tiene conocimiento de que haya habido eventos posteriores a 2019. La **Tabla 3.1** contiene la relación de estas reuniones y (donde se tiene la información) sus temas centrales. Una característica de estas es que se toman acuerdos entre los participantes de cada uno de los organismos de cuenca del país.

El análisis detallado de los contenidos de estas conferencias brinda hallazgos de gran valía para este proyecto. De particular interés son las reuniones de los años 2009, 2017 y 2018, no solo en relación con asuntos de gran fondo sobre la infraestructura hidráulica, sino porque diversos participantes con probadas credenciales subrayan la necesidad de invertir en el mantenimiento, rehabilitación y/o sustitución de infraestructura. Esto representa un enorme reto financiero, cuya discusión informada y su traducción en políticas públicas coherentes debería ser impostergable. En este marco, hace sentido la métrica seleccionada para medir el envejecimiento de la infraestructura, expresada como la edad de servicio en relación con la vida útil de diseño.

Tabla 3.1 Relación de Reuniones Nacionales de Infraestructura Hidráulica en México, 2009-2019.

Año	Tema	Lugar Sede
2009	El Sistema Financiero para la Infraestructura Hidráulica	Morelia, Michoacán
2010	Políticas Públicas para Impulsar la Inversión	Guadalajara, Jalisco
2011	Reunión Nacional de Infraestructura	Oaxaca, Oaxaca
2012	El Proyecto que México Necesita	Tijuana Baja California
2013	Atención Integral en el Sector Agua	Querétaro, Querétaro
2014	Infraestructura Hidráulica. El Gran Reto de México	Campeche, Campeche
2015	El Reto del Financiamiento Privado en la Infraestructura Hidráulica	Aguascalientes, Aguascalientes
2016	Fortalecimiento de la Política Hídrica en México	Bahía de Banderas, Nayarit
2017	Infraestructura Hidráulica Sostenible 2030	Ciudad de México
2018	Seminario del Agua 2018 "Misión de Empresas de la Industria del Agua <i>American Water Works Association</i> AWWA – CMIC	Ciudad de México – Monterrey, Nuevo León
2019	Conferencia Bilateral México-Estados Unidos para el Desarrollo de la Infraestructura de México	Ciudad de México

Fuente: Elaboración propia con base en:

https://www.cmic.org.mx/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/reuniones_nacionales.htm

3.3.4 Asociación Nacional de Entidades de Agua y Saneamiento de México (ANEAS) (<https://www.aneas.com.mx>)

La ANEAS es la asociación que aglutina a los organismos operadores de agua y saneamiento del país (OOs). En su portal la Asociación tiene una sección de documentos con información y datos valiosos sobre el agua en general y sobre infraestructura en general. En esta sección se encuentran: infografías, algunas muy útiles; informes internacionales, como los *World Water Development Reports 2015-2025*, publicados por Naciones Unidas y que son referencia obligada; libros (subsección limitada); y la revista Agua y Saneamiento (AyS). AyS es una publicación de amplia circulación y prestigio en el sector, con contenidos internacionales y nacionales de diversos asuntos, incluyendo la infraestructura. En su número 95 (julio-septiembre 2022), por ejemplo, se enfatiza el asunto de la inversión en infraestructura (pp. 22-24).

3.3.5 Organismos operadores de agua seleccionados

Los organismos operadores de agua (OOs) tienen una enorme responsabilidad en la provisión de los servicios de agua y saneamiento, aunque la mayoría de ellos opera en condiciones muy desfavorables. La insostenibilidad financiera es recurrentemente un tema de agenda, que generalmente se traduce en servicios muy deficientes. Los OOs poseen información muy valiosa para entender su problemática, y tomarle el pulso al estado de la infraestructura de agua, alcantarillado y saneamiento. Ha sido práctica común que los OOs reportaban información a entidades como la Comisión Nacional del Agua, para la elaboración del *Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, y también al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, para su reporte de indicadores PIGOO, ya referido.

Sin embargo, hay grandes vacíos y rezagos en la generación de esta información. Se reportan datos distintos, con diferentes escalas territoriales, y con series de tiempo distintas. Como también ya se ha mencionado, se tiene una tradicional desconfianza en la veracidad de la información reportada. Más aún, en los últimos años hay ausencias de información de organismos grandes, como el caso de la Ciudad de México, Guadalajara y Monterrey. Ya se indicó que este es también el caso de la información sobre los OOs contenida en los Censos Económicos de INEGI.

Se consultaron, solo como ilustración, los portales de los organismos de Ciudad de México (SACMEX), Monterrey (SADM), y Guadalajara (SIAPA). Los hallazgos son muy desalentadores. El caso de Monterrey es muy revelador. De ser un referente nacional y latinoamericano en la prestación de los buenos servicios de agua, estuvo en los encabezados de prensa internacional por su crisis de agua de 2022. Durante los últimos años SADM, ha dejado de publicar información que era de un enorme valor.

Hasta el 2016 SADM publicaba en su portal de Internet el *Anuario Estadístico sobre la Operación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey en el Área Metropolitana de Monterrey*, que contenía 63 estadísticas, agrupadas en siete dimensiones: (1) Operación (14); Ingeniería (10); Saneamiento (3); Proyectos Sustentables (10); Comercial (19);

Administración (4); y Finanzas (3). Sorprendentemente, en un par de hojas se presentaban estos 63 datos para una serie relativamente larga. El último Anuario contenía esta información para el periodo 2000-2016. No era una aportación menor. SADM también publicaba los programas operativos anuales, conocidos como POAS, y que contenían una gran riqueza de medición

Lo que actualmente publica SADM en su portal es una página con 30 datos útiles del año en curso, pero no tan comprensivos como antes. Aun con esta limitación, estos datos brindan una foto de la infraestructura de agua urbana y de cuestiones financieras y ambientales que no se encuentra en ninguna otra fuente. SADM tampoco envía información a CONAGUA para el Reporte del Subsector, ya mencionado. En el Censo Económico 2019, de INEGI, la información relativa a Nuevo León está ausente. También lo está la correspondiente a Ciudad de México.

En la **Tabla 3.2** se encuentra un concentrado del análisis realizado sobre los portales de los OOs mencionados. Se abrevia lo ya comentado para SADM y se ofrece una muy concisa reflexión sobre los contenidos. Monterrey y Guadalajara sí proporcionan información sobre infraestructura, no así el caso de Ciudad de México. Investigar que publican los OOs en general y de infraestructura hidráulica sería una asignatura pendiente, por lo menos en el caso de los organismos más grandes. La hipótesis sería que el país ha ido perdiendo capacidades de generación de estadísticas sobre agua e infraestructura a nivel estatal y local.

Tabla 3.2 Información sobre infraestructura publicada por Organismos Operadores Seleccionados (relacionado con infraestructura). 2025

Organismo	Contenido
SADM (Área Metropolitana de Monterrey)	Anuario estadístico – Información básica de número de tomas, longitud de tubería, coberturas, entre otros. Disponible en la sección de Indicadores. En el apartado Áreas existe información en forma de texto sobre Ingeniería, Saneamiento (PTARs), etc. Disponible en: https://pfiles.sadm.gob.mx/PFiles/indicadores
SACMEX (Ciudad de México)	No existe información relacionada con infraestructura. El portal está totalmente orientado a la parte comercial
SIAPA (Zona Metropolitana de Guadalajara)	No existe información relacionada con infraestructura. El portal está totalmente orientado a la parte comercial.

Fuente: Elaboración propia con base en la revisión de los portales de los organismos operadores seleccionados.

3.4 Comentarios concluyentes

La revisión de la literatura realizada. en el capítulo 2 fue instrumental para la metodología realizada utilizada en este proyecto. Los conceptos de infraestructura integrada e interdependiente fueron muy útiles como marcos de análisis y la selección del indicador

referido aquí como factor de envejecimiento. Como se muestra en este capítulo y se observa en los capítulos 4 y 5, se tienen alcances y limitaciones en la información disponible para medir el envejecimiento de la infraestructura hidráulica. Ciertamente en varias fuentes hay datos sobre la edad de la misma que permitieron construir el factor de envejecimiento de varios sistemas, así como información que ayuda a contextualizarlo. En otros casos hay ausencias, información incompleta, desactualizada o el acceso a los datos es muy poco amigable.

La efectividad y eficiencia en el acceso a fuentes de información en agua en general y de infraestructura hidráulica en particular depende de cuál es *la puerta* de acceso. También se encuentra la necesidad de sistematizar la información temática presentada, independientemente de la plataforma de acceso, para evitar, donde sea pertinente, duplicidades o inconsistencias en la forma en que se presenta la información. Si bien estos hallazgos se refieren principalmente a la información que publica la Comisión Nacional del Agua, también hay contribuciones y áreas de oportunidad en las otras fuentes de datos.

Anexo 3 (a) Información sobre envejecimiento de la infraestructura en México:
Fuentes y ligas de acceso., 2025 (noviembre)

Sistema	Fuentes	Liga de acceso
Varios	Conagua	https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/
Estaciones climatológicas	Servicio Meteorológico Nacional	https://smn.conagua.gob.mx/es/
	SINA - Sistema de Información Hidrológica (SIH)	https://sih.conagua.gob.mx/
	SINA - Conagua	https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=SIH
Estaciones hidrométricas	SINA - Conagua	https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=SIH
	Sistema de Información Hidrológica (SIH)	https://sih.conagua.gob.mx/
	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)	https://app.conagua.gob.mx/bandas/
Presas	SINA - Conagua	https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=monitoreo
	Sistema de Seguridad de Presas	https://presas.conagua.gob.mx/inventario/
Acueductos	SINA - Conagua	https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=monitoreo
	Estadísticas del agua en México 2023	https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/Descargas/pdf/EAM2023_f.pdf
Planta Potabilizadoras	Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1044537/DSAPAS_2025.pdf
Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1044537/DSAPAS_2025.pdf
	Observatorio Latinoamericano de Agua y Saneamiento	https://olasdata.org/repository/data-detail/17

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3 (b) Información sobre envejecimiento de la infraestructura en México:
Fuentes, descripción y comentarios sobre el acceso a los datos, 2025 (noviembre)

Sistema	Fuentes	Descripción	Comentarios
Varios	Conagua	Portal de Sistemas de Información del Agua	Presenta íconos de acceso sin mayor descripción
Estaciones climatológicas	Servicio Meteorológico Nacional	Registro histórico de estaciones climatológicas convencionales Registro hasta de 90 días atrás de estaciones meteorológicas automáticas (10 min)	Interfaz propia poco intuitiva. Descarga de archivos casi inexistente. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
	SINA - Sistema de Información Hidrológica (SIH)	Base de datos histórica del SIH de estaciones climatológicas	Un gran número de archivos en CSV incluyendo catálogo e interfaz gráfica general . Existen estaciones con claves que no coinciden con las del SMN. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
	SINA - Conagua	Ubicación y generalidades de las estaciones	No incluye los registros, solo tabla con datos de identificación y mapa de ubicación. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
Estaciones hidrométricas	SINA - Conagua	Ubicación y generalidades de las estaciones	No incluye los registros, solo tabla con datos de identificación y mapa de ubicación. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
	Sistema de Información Hidrológica (SIH)	Base de datos histórica del SIH de estaciones hidrométricas	Un gran número de archivos en CSV incluyendo catálogo e interfaz gráfica general . Existen estaciones con claves que no coinciden con las del BANDAS. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
	Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)	Base de datos histórica con cálculos hidrométricos	Desactualizada. Solo permite descarga de archivos ZIP. No incluye explícitamente la edad ni fecha de instalación.
	Observatorio Latinoamericano de Agua y Saneamiento	Inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México, con 2810 registros.	Solo 389 registros cuentan con información de año de inicio de operaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3 (c) Información sobre envejecimiento de la infraestructura en México:
Fuentes, descripción y comentarios sobre el acceso a los datos, 2025 (noviembre) - Continuación

Sistema	Fuentes	Descripción	Comentarios
Presas	SINA - Conagua	Información general y situación a fecha de actualización en un entorno gráfico. Es monitero de las 210 principales presas.	Desactualizada. Permite generar gráficas del comportamiento por RHA. No incluye edad ni fecha de construcción.
	Sistema de Seguridad de Presas	Inventario con 6734 registros de presas en varios conceptos. Información con detalle	Se debe accesar registro por registro a fin de extraer la información del año de construcción, misma que no siempre está disponible.
Acueductos	SINA - Conagua	Reporte de los 20 acueductos principales a 2020. En el acceso usado para el reporte se consignaban los 80 principales.	La opción se encuentra poco visible, dentro del rubro de Coberturas de Agua Potable y Alcantarillado. Sí incluye año de inicio de operación.
	Estadísticas del agua en México 2023	Publicación oficial. Última publicación de 2023.	Incluye informacion de los 53 principales acueductos. Sí incluye año de inicio de operación
Planta Potabilizadoras	Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	Edición 2025. Incluye información de 1993 a 2024.	No incluye información explícita de edad. Se debe inferir y solo es posible a partir de 1993
Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales	Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento	Edición 2025. Incluye información de 2000 a 2024.	No incluye información explícita de edad. Se debe inferir y solo es posible a partir de 2000
	Observatorio Latinoamericano de Agua y Saneamiento	Inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México, con 2810 registros.	Solo 389 registros cuentan con información de año de inicio de operaciones.

Fuente: Elaboración propia.

4

Infraestructura Hidráulica en México. Escala Nacional

En la escala nacional es importante reconocer la importancia de la infraestructura hídrica pues es ésta la que en buena medida soporta la seguridad hídrica del país. Al paso del tiempo, toda infraestructura va presentando signos de envejecimiento y problemas funcionales que pueden llegar a volverla obsoleta. En este capítulo se presenta el análisis de la edad de distintos componentes del sistema hídrico en México como lo son: la red climatológica y la red hidrométrica; ambas básicas para la adquisición de información de variables físicas. Asimismo, se presenta información de la edad de presas y acueductos, como los primeros elementos de almacenamiento y transporte para llevar el agua hasta donde se requiere. El capítulo concluye con información de las plantas potabilizadoras y de tratamiento, que son piezas críticas para la salud pública y el enfoque de circularidad del agua. Conocer y comprender el envejecimiento de la infraestructura es una necesidad para dimensionar la vulnerabilidad actual del país, pero sobre todo para orientar los esfuerzos del sector hacia la construcción de resiliencia de frente a un futuro altamente incierto.

4.1 Estaciones Climatológicas e Hidrométricas

4.1.1 Red climatológica

Como es sabido, las labores de medición, monitoreo y evaluación de los componentes del ciclo hidrológico son fundamentales para la planeación del aprovechamiento del agua y la operación de la infraestructura hidráulica, así como para la instrumentación de esquemas de protección civil ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos y contingencias hidro-ambientales.

El propósito principal de esta sección es analizar la base de datos a fin de identificar patrones relevantes sobre la operación histórica de las estaciones, así como determinar el tiempo promedio en que éstas han estado activas. Por supuesto, es muy relevante conocer la edad en años desde su instalación (fecha del primer registro). El análisis se desarrolló tanto por entidades federativas como también por Organismo de Cuenca.

En referencia a la información registrada en el portal del Sistema Nacional de Información del Agua (sina.conagua.gob.mx), al 30 de junio de 2025 se contaba con 2,515 estaciones climatológicas convencionales en operación (**Figura 4.1**).¹ De acuerdo con la densidad recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) para las condiciones de México, el número óptimo de estaciones a fin de tener un monitoreo adecuado se encuentra entre 6 y 7 mil. Es importante señalar que la distribución de las estaciones en el país no es homogénea, siendo que hay regiones con carencias evidentes de monitoreo, como se observa en la propia **Figura 4.1**. La observación de variables climatológicas en México incluye, dentro de las 2,515 estaciones, una red de 84 observatorios meteorológicos, en donde se llevan a cabo observaciones en base trihoraria de algunas variables adicionales, como lo son presión atmosférica, dirección y velocidad de viento y radiación solar entre otras.

Cabe señalar que, como parte de las contribuciones del presente estudio, se llevó a cabo un análisis detallado de la base de datos completa de estaciones climatológicas convencionales (base de registro diaria), disponible en el Sistema de Información Hidrológica (**CONAGUA, 2025**), con fecha de corte de la información al mayo de 2025. También se revisó la base de datos disponible en el sitio del Servicio Meteorológico Nacional (**SMN, 2025**). Del SIH se pudo recuperar información histórica de 7,981 estaciones. Teniendo como referencia el número de estaciones activas a junio de 2025, apenas el 31.5% del total que alguna vez existieron se encuentra midiendo actualmente. Cabe señalar que, con base en un ejercicio de contrastación aleatorio, existen algunas diferencias en las bases de datos del SIH y del SMN. Con información de la CONAGUA, el SIH es el sistema oficial que concentra toda la información hidro- climatológica. En ese sentido, el SMN debe alimentar la base de datos del SIH. Quizás ésta sea la razón por la cual la información del SMN se encuentre más actualizada que la del SIH. Este hallazgo resulta de importancia para las personas interesadas en la información, quienes deberán estar conscientes de las diferencias existentes entre ambas fuentes de datos.

Indicadores de operación diaria y edad promedio de las estaciones

Se obtuvieron indicadores clave derivados de las series de tiempo procesadas. Éstos se calcularon con base en los periodos de registro disponibles en cada estación. Se considera como operación diaria la existencia de datos en al menos un renglón (día) en la columna de

¹ Estas estaciones funcionan con una base temporal diaria, registrando valores de precipitación, evaporación y temperaturas mínima, máxima y ambiente. Las observaciones se realizan, por norma, a las 8:00 AM en su gran mayoría por personal *gratificado* por la propia Conagua.

precipitación. Cabe añadir que estas estaciones climatológicas convencionales registran otras variables tales como temperaturas y evaporación, por ejemplo. Sin embargo, el análisis se realizó utilizando la variable precipitación como representativa de la operación de la estación. La edad promedio de las estaciones se generó en tres niveles, nacional, estatal y por Región Hidrológica-Administrativa (Organismo de Cuenca). La información completa se incluye en el **Anexo Digital 4**.

Figura 4.1. Estaciones climatológicas en operación en México, 2025 (septiembre)



Fuente: CONAGUA (2025)

Dentro de los resultados, resalta el hecho de que a nivel nacional se tiene una operación diaria del 57%, lo cual indica una gran porosidad en la base de datos. Además, la edad promedio de las estaciones, estimada a partir de la primera fecha de registro, es de 53 años. En el ámbito de los estados, Aguascalientes tiene la máxima operación diaria (76 %) y Chihuahua la mínima (40%). En cuanto a la edad promedio, en la Ciudad de México se alcanzan los 64 años (las más antiguas) y en Tabasco solamente 42 años (las menos antiguas). Por lo que respecta a las regiones hidrológico-administrativas, Península de Yucatán alcanza el 69% en operación diaria, mientras Río Bravo solamente el 49%. En cuanto a la edad promedio de las estaciones, en Lerma-Santiago-Pacífico se alcanzan los 55 años mientras en Frontera Sur es de 46 años.

En la **Tabla 4.1** y **Figura 4.2** se muestra la información y un histograma con la distribución de la antigüedad de las estaciones climatológicas en México. Para efectos de representación, se han utilizado intervalos de 10 años. El rango con mayor número de estaciones es el de 41 a 50 años de edad (1, 879 estaciones), representando el 24% de la totalidad de la base de datos histórica. Se observa que el 62% del total tiene edades entre

41 y 70 años, periodo que seguramente ha sobrepasado la vida útil de esa infraestructura. De la información analizada se desprende que el 81% de las estaciones climatológicas tiene edades mayores de 40 años. También vale la pena resaltar que 212 estaciones (casi el 3% de la base histórica) tienen edades de más de 100 años. Es importante en algún momento **cruzar** esta información con la del mantenimiento para tener una mejor percepción del estado de operación. Es de subrayar que en la última década solamente se han instalado 410 estaciones, apenas el 5% del total de la base de datos histórica.

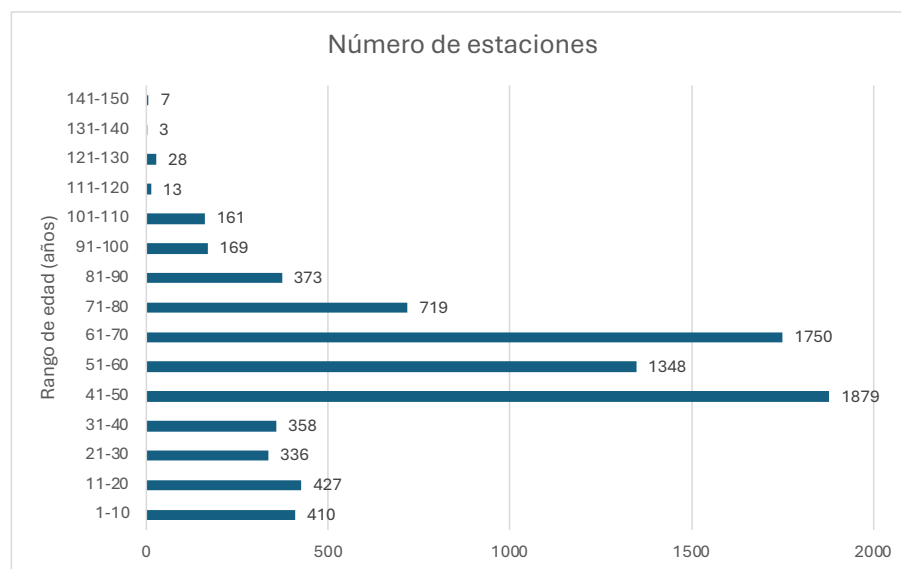
Conviene resaltar el hecho de que cuando se habla de infraestructura de medición, ya sea climatológica, meteorológica o hidrométrica, la edad de ésta implica en efecto posibles problemas ya sea por fin de su vida útil o sus deficiencias en mantenimiento, rehabilitación o reemplazo. Aunque también se da cuenta de los registros históricos disponibles, lo cual representa una base de datos que trasciende los cien años.

Tabla 4.1 Distribución de la antigüedad de estaciones climatológicas en México, 2025 (mayo).

Rango de edad (años)	Número de estaciones	Porcentaje nacional	Porcentaje acumulado
1–10	410	5.1	5.1
11–20	427	5.4	10.5
21–30	336	4.2	14.7
31–40	358	4.5	19.2
41–50	1879	23.5	42.7
51–60	1348	16.9	59.6
61–70	1750	21.9	81.5
71–80	719	9.0	90.6
81–90	373	4.7	95.2
91–100	169	2.1	97.3
101–110	161	2.0	99.4
111–120	13	0.2	99.5
121–130	28	0.4	99.9
131–140	3	0.0	99.9
141–150	7	0.1	100.0

Fuente: Elaboración propia con base en el análisis realizado

Figura 4.2. Distribución de la antigüedad de estaciones climatológicas en México, 2025 (mayo)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional

Evolución de la incorporación anual de estaciones

En la **Figura 4.3** se muestra el proceso de incorporación de estaciones climatológicas a la base de datos histórica a lo largo del tiempo. En esta información no se hace diferencia sobre cuáles estaciones se incorporaron en cada año, pero sí se reflejan los periodos en que la relevancia sobre el fortalecimiento de la red climatológica fue incremental y aquellos en que las inversiones orientadas a esta infraestructura han sido más que limitadas.

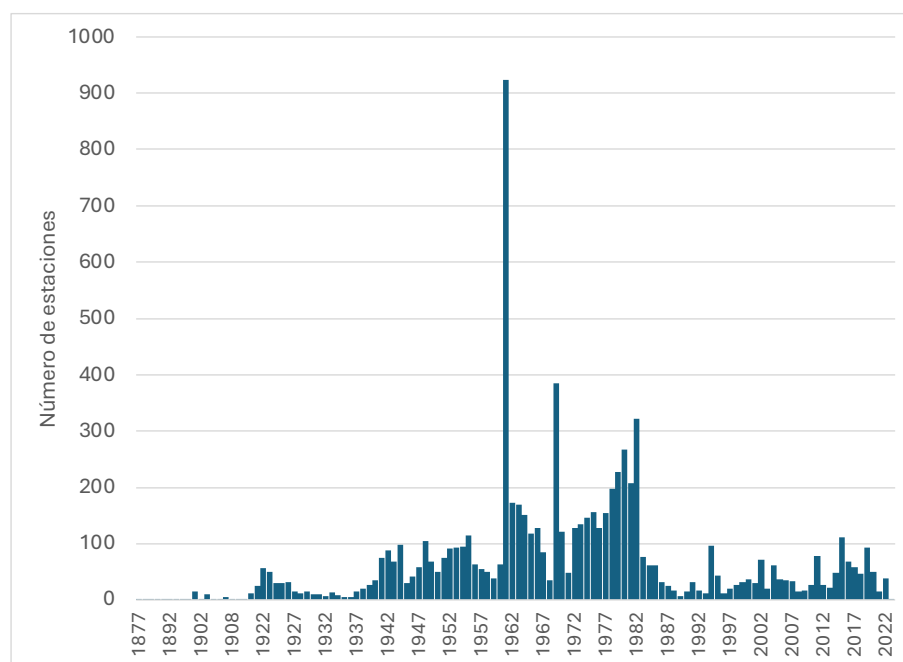
Es de notar que el inicio de los registros data de fines de 1880, aunque con una continuidad muy limitada. A partir de esa fecha se fueron incorporando pocas estaciones a la red de medición. Hacia la década de 1920 se reflejan los primeros esfuerzos en consolidar una red consistente. Los 1930s fueron de poco movimiento y desde los 1940s hasta fines de los 1950s se tuvo un ritmo aproximadamente constante en la instalación de nueva infraestructura climatológica. Resalta el año 1961 en donde se tiene un pico de más de 800 estaciones en un solo año y el año 1969 con algo más de 370 estaciones. Entre 1960 y 1980 se tiene el mejor periodo para el fortalecimiento de la red. A partir de 1981 el ritmo de instalación ha sido muy moderado con menos de 100 estaciones por año. Por supuesto, esto se refiere a instalación de nuevas estaciones y excluye la información de las que han dejado de operar.

Estaciones activas por año

En la **Figura 4.4** se muestra el número de estaciones climatológicas activas por año. Este análisis se realizó considerando como activas aquellas que reportaron datos al menos seis

meses del año y cada uno de esos meses con un mínimo de 15 días con datos. Este enfoque evita la sobrestimación de la cobertura con estaciones que tienen registros muy esporádicos. De la figura se observa el franco crecimiento de la red operativa a partir de la década de 1940, con un aumento notorio en 1961, para seguir creciendo hasta 1985. A partir de ese año, se ha tenido un notable decrecimiento de la red activa, perdiendo del orden de 1500 estaciones hacia 1990. Luego se observa un periodo con una red estable hasta 2017, año a partir del cual la red disminuyó severamente en número para el año 2023. Expresado de otra manera, la **Figura 4.4** sugiere que la red climatológica actual tiene un nivel de medición (en número de estaciones) similar al que se tenía a mediados de la década de los 1950s. Esto implica que en México se dispone de una red climatológica convencional similar a la de hace 75 años.

Figura 4.3. Número de estaciones instaladas por año en México, 1877 – 2025 (mayo)



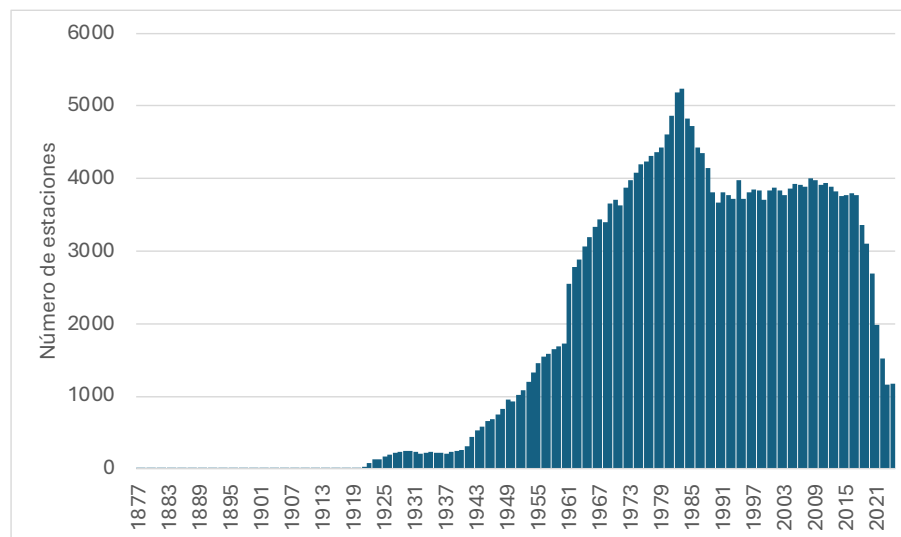
Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional

Indicadores de la red climatológica activa en el contexto nacional

En el **Anexo Digital 4** la información sobre las 2,515 estaciones activas se ha clasificado en regiones norte, centro y sur, mostrándose también la dimensión estatal. En una agregación a nivel regional, se observa que la región con la más alta densidad es la centro, con 2.691 estaciones por cada 1000 km². La región sur presenta una densidad de 1.495 estaciones/1000 km². La región norte resulta con la densidad más baja, siendo apenas 0.769 estaciones por cada kilómetro cuadrado. A nivel nacional se tiene, a la fecha de este reporte, una densidad de 1.282 estaciones por cada mil kilómetros cuadrados. Esta cifra se encuentra muy por debajo de las recomendaciones de la OMM para México (por encima de dos estaciones por cada mil kilómetros cuadrados) (**WMO, 2018**). En cuanto al nivel estatal,

la densidad de estaciones climatológicas por cada 1000 km² varía entre 10.502 (para Aguascalientes) y 0.065 (para Chihuahua).

Figura 4.4. Estaciones climatológicas activas por año (al menos 6 meses de operación) en México, 1877 – 2025 (mayo)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional

Cabe comentar que existen algunos factores que podrían explicar la necesidad de una mayor o menor densidad de estaciones. Entre éstos se tienen a la topografía, la importancia de la relación lluvia-escorrentía y el uso de agua en la región. Aunque en definitiva las tres regiones requieren de importantes inversiones para fortalecer la infraestructura de medición de variables climatológicas en cuanto a datos diarios se refiere.

Como se ha mencionado, la observación de variables climatológicas en México incluye también una red de 84 observatorios meteorológicos, en donde se llevan a cabo observaciones trihorarias de algunas variables adicionales. Entre estas se tienen la presión atmosférica, dirección y velocidad de viento, horas de sol y radiación solar. En apoyo a esta medición también existe una red de 15 estaciones de radiosondeo distribuidas en el territorio nacional. También merece la pena mencionar que en México existe una red meteorológica automática con un intervalo de registro de diez minutos.

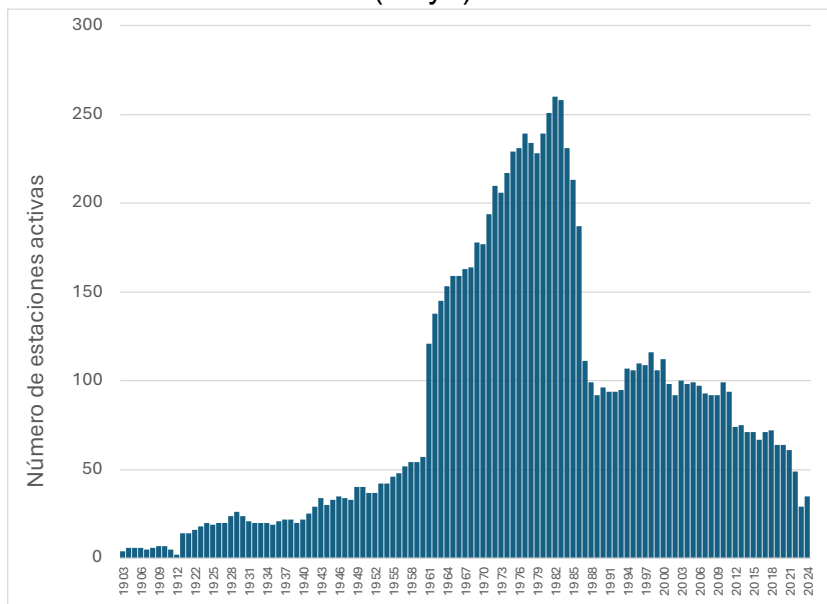
En el **Anexo Digital 4** se incluyen las gráficas correspondientes a la evolución de la red climatológica activa tanto en el ámbito estatal como en el de la región hidrológico-administrativa. Como ejemplo se incluyen aquí el caso de Chihuahua (**Figura 4.5**), uno de los más rezagados y la Región Río Bravo (**Figura 4.6**).

Envejecimiento de la red climatológica

Con base en la información recopilada sobre las estaciones climatológicas a la escala nacional, existen en la base de datos 7,981 registros (**Tabla 4.1**). La edad promedio de las estaciones es de 54 años; es decir, presentan en promedio 14 años más que su vida útil.

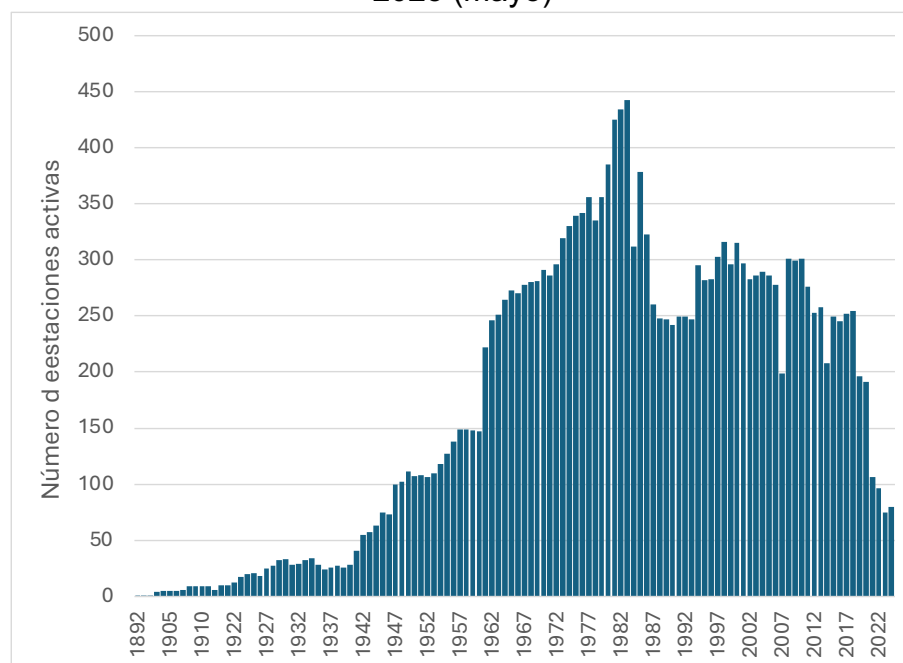
Se tienen 6,450 estaciones (o el 81% del total) cuya edad supera su vida útil. La relación media de edad sobre vida útil es de 1.34, lo que cual se puede interpretar que en promedio la edad de la red climatológica se encuentra ya 34% por encima de su periodo útil.

Figura 4.5 Evolución de estaciones climatológicas activas en Chihuahua, 1903 – 2025 (mayo)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional

Figura 4.6. Evolución de estaciones climatológicas activas en la RHA Río Bravo, 1892 – 2025 (mayo)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del Servicio Meteorológico Nacional

Por supuesto, el indicador mencionado en el párrafo anterior se encuentra calculado sobre la consideración de que la infraestructura de las estaciones, tal como lo son los equipos y sensores, no hayan sido sustituidos. Esa información sobre el mantenimiento, mejora, rehabilitación o sustitución es de gran relevancia para estar en condiciones de disponer de mejor información sobre la obsolescencia de la red o de al menos algunos de sus componentes. Desafortunadamente, dicha información no se encuentra disponible públicamente y en general es de muy difícil recopilación.

Estaciones climatológicas, su operación y mantenimiento

Una estación climatológica convencional (**Figura 4.7**) con registro diario usualmente contiene instrumentos para la medición de las siguientes variables:

1. Precipitación. Medida a través de un pluviómetro convencional (lectura manual)
2. Temperaturas. Los termómetros ubicados en el abrigo termométrico permiten la observación de temperatura ambiente (usualmente tomada a las 8am), temperatura máxima y temperatura mínima (ambas referida a las 24 h anteriores a la toma de la lectura).
3. Evaporación. Medida a través de un tanque evaporímetro (lectura manual)
4. Distribución temporal de la lluvia diaria. Registrada a través de un pluviógrafo. Aunque en algunos casos se tiene un pluviógrafo en sitio (como en la Estación mostrada en la **Figura 4.7**) éste se encuentra fuera de operación.
5. Observaciones cualitativas de velocidad y dirección del viento (con veleta) y visibilidad. En ocasiones también cobertura de nubes.

A pesar de que la disposición y operación de estas estaciones es en extremo básica, suelen salir de operación por una serie de distintas razones como pueden ser:

1. Vandalismo o robo. Las estaciones climatológicas a menudo están ubicadas en áreas remotas y pueden ser objeto de vandalismo o robo de sus componentes, lo cual puede interrumpir su funcionamiento. En México, prácticamente la totalidad de estaciones cuenta con una protección de malla ciclónica lo que hay disminuido el vandalismo.
2. Falta de financiamiento. La operación y mantenimiento de estaciones climatológicas requieren recursos económicos. En muchos casos, puede haber recortes presupuestarios o falta de fondos suficientes para mantenerlas en funcionamiento.
3. Falta de personal capacitado. La operación y mantenimiento de estas estaciones requieren personal capacitado. La falta de entrenamiento o la falta de personal pueden ser problemas significativos. En México el personal que adquiere los datos, normalmente, no está formalmente adscrito a la Comisión Nacional del Agua, sino que colabora en base a un esquema de “gratificación”. Esta es una de las principales razones de la falta de datos y por lo tanto de la porosidad de la base de datos.
4. Condiciones Climáticas Severas. Eventos climáticos extremos como huracanes, tormentas severas o inundaciones pueden dañar las estaciones y sacarlas de operación temporal o permanentemente.
5. Cambios en el Uso del Suelo. La urbanización o cambios en el uso del suelo también pueden afectar las estaciones, obligándolas a ser reubicadas o desmanteladas.
6. Obsolescencia Tecnológica. Las estaciones pueden quedarse obsoletas con el tiempo si no se actualizan con las nuevas tecnologías. Esto puede llevar a una disminución de la precisión y la fiabilidad de los datos recolectados. Por la naturaleza del tipo de estaciones en México, este no se identifica como un problema grave. Los instrumentos son muy básicos y no han

sufrido cambios por años. Un problema que podría suscitarse, sin embargo, es la pérdida en la calibración de los instrumentos, principalmente los termómetros.

7. Falta de interés en la política hídrica. Esto parece ser un factor muy relevante, dada la información de instalación de nuevas estaciones y la pérdida de estas. Finalmente, al hablar de obsolescencia de la red climatológica se deben tener en mente todos los factores anteriores. En México, sin duda, los tres primeros factores son los más importantes.

Figura 4.7. Estación climatológica 32030 La Florida en Valparaíso, Zacatecas.



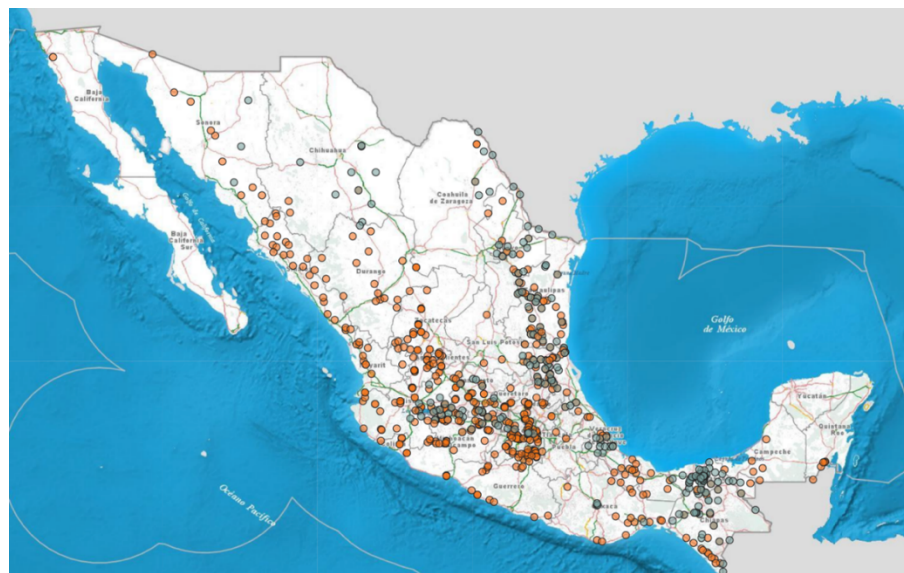
Fuente: Archivo de los autores

4.1.2. Red hidrométrica

La red hidrométrica en México está formada por estaciones de medición de gastos (o caudales).² Las estaciones se encuentran sobre ríos principales y sobre algunos canales construidos. A junio de 2025, la Comisión Nacional del Agua, a través del Sistema Nacional de Información del Agua (sinav30.conagua.gob.mx) reporta la ubicación de 812 estaciones hidrométricas (**Figura 4.8**). Para el análisis de la red hidrométrica presentado en esta sección se trabajó con información proveniente del Sistema de Información Hidrológica (sih.conagua.gob.mx). Para este caso, no existe una base de datos alterna en el sitio del Servicio Meteorológico Nacional. La base de datos contiene un inventario de 1,172 estaciones con datos históricos. El acceso se realizó en julio de 2025 con el inventario verificado en junio del mismo año.

² En las estaciones hidrométricas se realiza, en general, una medición diaria, aunque ante la presencia de fenómenos extraordinarios se pueden realizar dos mediciones al día. Las mediciones se llevan a cabo con el método sección-velocidad.

Figura 4.8. Red hidrométrica activa en México, 2025 (junio).



Fuente: CONAGUA (2025).

Indicadores de operación diaria y edad promedio de estaciones hidrométricas

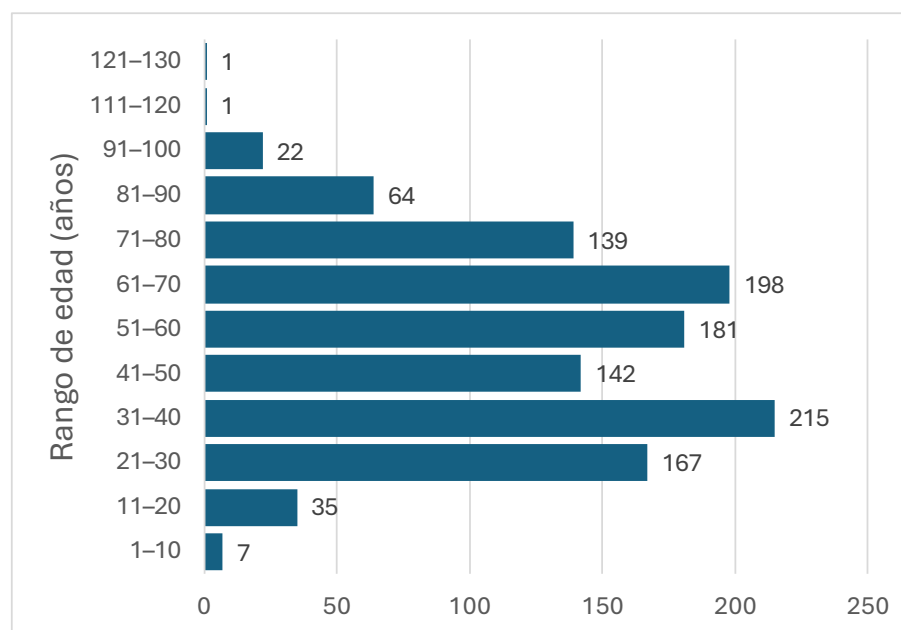
Los indicadores derivados de las series de tiempo procesadas se calcularon con base en los periodos en los que cada estación tiene registros disponibles. Se considera como operación diaria, la presencia de datos en por lo menos un día (fila) en la columna de gasto (m^3/s). De esta manera se calcula el porcentaje de operación diaria como la razón de días con dato y los días totales del registro (definido desde primera fecha de registro y la más reciente, ya sea la actual o la del último registro). Por lo que respecta al porcentaje diario de operación, éste varía entre el 10% para Baja California, hasta el 72% en Tabasco, siendo el indicador nacional de un 52%. En este primer indicador se han excluido a Yucatán y Quintana Roo, en donde no se tienen estaciones registradas. Si el análisis se realiza sobre las regiones hidrológico-administrativas la operación diaria se encuentra entre 19% para Península de Baja California y un 62% para Pacífico Sur. La información completa por estado se incluye en el **Anexo Digital 4**.

Antigüedad de estaciones hidrométricas

Con base en la información fuente de la base de datos se ha calculado la edad promedio de las estaciones a tres niveles: nacional, estatal y por región hidrológico-administrativa (organismo de cuenca). La edad promedio se determina también como el tiempo transcurrido (en años) entre el primer día con registro disponible y la última fecha en la que se reportó un dato en cada estación. En cuanto a la edad promedio de las estaciones por estado, el rango queda establecido por Baja California Sur con una edad promedio de 40 años y Coahuila de Zaragoza con 70 años. Por lo que respecta la edad promedio por región

hidrológico-administrativa el rango varía entre Aguas del Valle de México con 43 años y Río Bravo con 55 años. El promedio nacional se encuentra en 50 años de edad. En la **Figura 4.9** se presenta el histograma de frecuencias correspondiente a la edad de las estaciones hidrométricas en el contexto nacional. Se muestra la distribución agrupada en intervalos de 10 años. Se observa que la mayoría de las estaciones tiene entre 31 y 40 años de edad, seguidas por las de edad entre 61 y 70 años. Asimismo, se observa que el 64 % de las estaciones tienen más de 40 años de edad y prácticamente la mitad de esta infraestructura supera los 51 años. Esta información también se puede apreciar en la **Tabla 4.2**. En ella se observa también que el 20% tiene ya más de 61 años y un 8% más de 71 años. Si no se han llevado a cabo labores de conservación tales como mantenimiento, rehabilitación o reemplazo, la mayoría de las estaciones habrán cumplido su vida útil.

Figura 4.9. Distribución de la antigüedad de estaciones hidrométricas en México, 2025 (junio)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del SIH de CONAGUA

Evolución de incorporación anual de estaciones hidrométricas

La **Figura 4.10** muestra la evolución de la incorporación de estaciones hidrométricas con datos anuales. La información indica la incorporación de un promedio de 13 estaciones por año en el periodo de 1900 a 2019. Sin embargo, el rango varía entre 1 (en nueve distintos años) y 196 en el año 1995, siendo éste una incorporación completamente atípica a la red hidrométrica. Es de señalar que la red hidrométrica es más densa en las regiones con cauces de mayor importancia. Con respecto a la distribución espacial por región hidrológico-administrativa se repite el patrón en que la región centro es la que cuenta con una mejor cobertura, con una densidad de 1.104, seguida de la región sur con 0.447 estaciones por cada 1000 km², y finalmente la región norte con apenas 0.194 estaciones por cada 1000

kilómetros cuadrados. Las densidades de estaciones varían desde cero en Yucatán hasta 4.905 en Morelos.

Tabla 4.2 Distribución de la antigüedad de estaciones hidrométricas en México, 2025 (junio)

Rango de edad (años)	Número de estaciones	Porcentaje nacional	Porcentaje acumulado
1–10	7	0.6	0.6
11–20	35	3.0	3.6
21–30	167	14.2	17.8
31–40	215	18.3	36.2
41–50	142	12.1	48.3
51–60	181	15.4	63.7
61–70	198	16.9	80.6
71–80	139	11.9	92.5
81–90	64	5.5	98.0
91–100	22	1.9	99.8
111–120	1	0.1	99.9
121–130	1	0.1	100.0

Fuente: Elaboración propia con base datos del SIH de CONAGUA

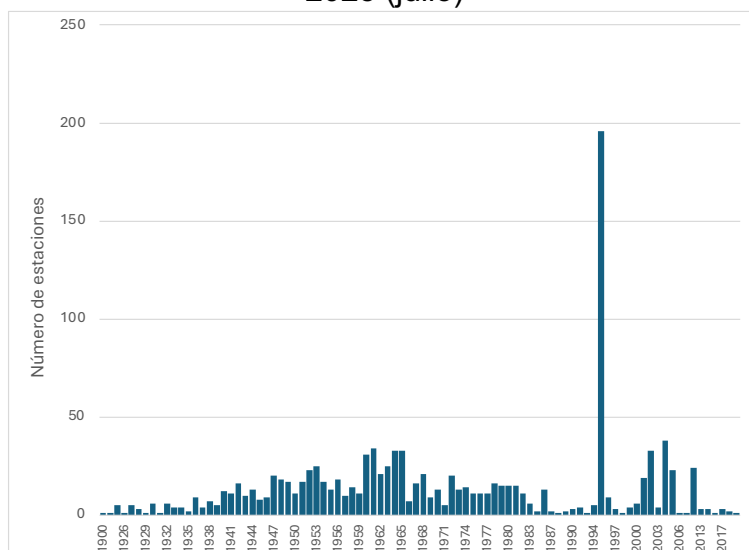
Resulta pertinente hacer una aclaración sobre estas métricas. En virtud de que las estaciones hidrométricas se ubican en secciones de los cauces, este indicador no puede necesariamente ser uniforme en el territorio. Es claro que las zonas de las planicies y los litorales presentan condiciones más adecuadas para la instalación de una estación hidrométrica, Sin embargo, aún con esta aclaración, la densidad nacional de 0.413 estaciones/1000 km² y las regionales son en definitiva muy bajas para llevar a cabo un monitoreo adecuado de los caudales que fluyen por los ríos mexicanos. Incrementar esta cobertura de medición es, sin duda, una asignatura pendiente para el país.

Estaciones hidrométricas activas por año

En la **Figura 4.11** se muestra el número de estaciones hidrométrica por año, considerando como activas aquellas que reportaron datos de gasto al menos seis meses del año y que en cada uno de esos meses se registran al menos 15 días con datos. Si bien la hidrometría en México comenzó a principios del siglo pasado, el crecimiento sostenido de la red se observa claramente a partir de 1920. El crecimiento fue constante o incluso exponencial hasta 1964. A partir de ese año y hasta 1982 el incremento fue muy ligero. Se aprecia que después de ese año, el interés en mantener una red hidrométrica operativa se perdió puesto que en los siguientes 12 años 81 estaciones dejaron de registrar. Aun cuando existió una ligera mejora entre 1994 y 2001, la tendencia negativa después de esa fecha ha continuado. A la fecha de revisión y análisis de la base datos, solo 219 estaciones presentan más de seis meses

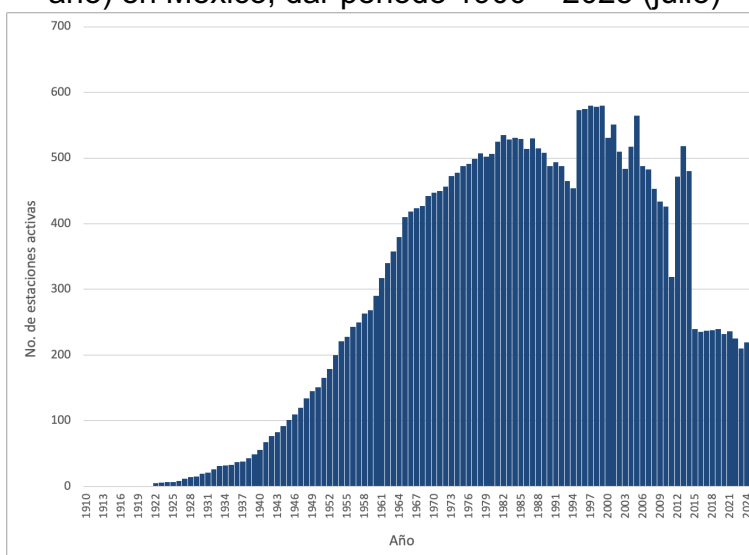
de operación al año, con meses de al menos 15 días de registro. Este nivel de medición se asemeja al nivel de medición que se tenía a mediados de los 1950s. En el **Anexo 4**, se presenta información correspondiente a la evolución de las estaciones hidrométricas activas por estado y por región hidrológico-administrativa. La tendencia general a nivel nacional se preserva, aunque con diferencias locales.

Figura 4.10. Estaciones incorporadas por año a la red hidrométrica en México, 1900 – 2025 (julio)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del SIH de CONAGUA

Figura 4.11. Estaciones hidrométricas activas por año (al menos 6 meses de registros al año) en México, dar periodo 1900 – 2025 (julio)



Fuente: Elaboración propia con base en datos del SIH de CONAGUA

Envejecimiento de la red hidrométrica

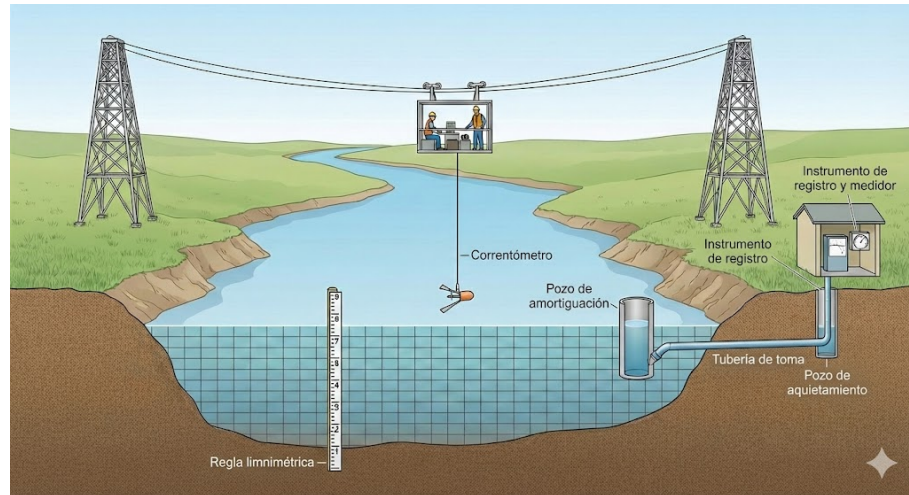
Con respecto a la red hidrométrica y con base en la información resumida en la **Tabla 4.2**, se tiene una base de datos de 1,172 estaciones en total, mismas que tienen una edad promedio de 50 años. Al considerar una vida útil de 40 años, se tiene que, en promedio, la red hidrométrica presenta un excedente de 10 años. De hecho, 748 estaciones (o el 64% del total), presentan ya una edad que supera su vida útil. Al aplicar el indicador de edad sobre vida útil, se encuentra que se alcanza un valor de 1.27. En promedio, se puede interpretar que a nivel nacional, la red hidrométrica se encuentra un 27% por encima de su vida útil. De la misma forma que para la red climatológica, los indicadores de la red hidrométrica se calcularon sobre la consideración de que la infraestructura y equipo de medición, no se han sustituido desde su instalación. En caso de existir registros de mantenimiento, rehabilitación o sustitución, se dispondrá de una mejor información para establecer de forma más certera el grado de envejecimiento y obsolescencia de la red hidrométrica.

Estaciones hidrométricas, su operación y mantenimiento

Una estación hidrométrica convencional como la mostrada en la **Figura 4.12**, también conocida como estación de aforo, consiste en una instalación diseñada para medir el gasto o caudal que circula por una corriente de agua natural (río) o artificial (canal). Se compone básicamente por:

1. Zona con ubicación estratégica. Se ubican en sitios específicos en el río, arroyo o canal en donde se puede medir el flujo en todas las épocas del año. Generalmente se evalúan condiciones de accesibilidad, estabilidad, sección del cauce, características del tramo de río, entre otras.
2. Infraestructura. Una estación hidrométrica convencional en lo general incluye al menos una caseta o estructura para el almacenamiento del equipo. También se tienen estructuras en ambos márgenes del río a modo de torres que permiten el tendido de un cable transversal a la corriente. Sobre el cable se instala una canastilla (**Figura 4.13**), útil para llevar a cabo el aforo a lo largo de la sección transversal del río. Si la sección de aforo es en un puente, esa misma estructura sustituye al cable y la canastilla. En el caso en que el aforo se realice en una corriente menor, el proceso se puede hacer directamente entrando a pie a la corriente.
3. Equipamiento. En México, las estaciones hidrométricas convencionales cuentan con un dispositivo de aforo, generalmente un denominado molinete de copas. El instrumento permite medir la velocidad del flujo. Ésta y la geometría del cauce al momento del aforo permite calcular el gasto o caudal. Generalmente, las estaciones cuentan con una escala vertical (registrador de nivel) para la observación y registro del nivel del agua en el sitio.
4. Operadores. La estación cuenta con al menos un operador (aforador) aunque idealmente se requieren dos, para efectuar las mediciones. En México, los aforadores sí forman parte de la estructura de la CONAGUA como trabajadores formales.
5. Plan de aforos. En nuestro país se tiene establecido como plan de aforos, realizar una medición diaria a las 8am. En algunas estaciones y en época de avenidas (grandes eventos) se pueden realizar dos aforos diarios.

Figura 4.12. Esquema de una estación hidrométrica convencional



Fuente: Imagen generada con Gemini y el modelo Nano Banana

Figura 4.13. Personal realizando un aforo desde la canastilla



Fuente: Archivo IMTA

La disposición y operación de estas estaciones es muy básica, pero aun así suelen salir de operación por distintas razones como pueden ser:

- 1 Vandalismo o robo. Las estaciones hidrométricas pueden ser objeto de vandalismo o robo de sus componentes, lo cual puede interrumpir su funcionamiento. En México, prácticamente la totalidad de estaciones cuenta con infraestructura en la que el aforador habita, por lo que el vandalismo se limita en ocasiones a las torres y el cable/canastilla, no al equipo.
- 2 Falta de financiamiento. La operación y mantenimiento de estaciones hidrométricas requieren recursos económicos. En muchos casos, puede haber recortes presupuestarios o falta de fondos suficientes para mantenerlas en funcionamiento.
- 3 Falta de personal capacitado. La operación y mantenimiento de estas estaciones requieren personal capacitado. La falta de entrenamiento o la falta de personal pueden ser problemas significativos. En México el personal que opera estas estaciones sí se encuentra en la

- estructura formal de la CONAGUA, pero existe una rotación importante. Esta puede ser una de las razones de la falta de datos y por lo tanto de la porosidad de la base de datos.
- 4 Condiciones Climáticas Severas. Eventos climáticos extremos como huracanes, tormentas severas o inundaciones pueden dañar las estaciones y sacarlas de operación temporal o permanentemente.
 - 5 Cambios en el Uso del Suelo. La urbanización o cambios en el uso del suelo también pueden afectar las estaciones, obligándolas a ser reubicadas o desmanteladas. En México no parece ser un problema.
 - 6 Obsolescencia Tecnológica. Las estaciones pueden quedarse obsoletas con el tiempo si no se actualizan con las nuevas tecnologías. Esto puede llevar a una disminución de la precisión y la fiabilidad de los datos recolectados. Por la naturaleza del tipo de estaciones en México, este no se identifica como un problema grave. Los instrumentos son muy básicos y no han sufrido cambios tecnológicos por varias décadas. Un problema que podría suscitarse, sin embargo, es la pérdida en la calibración de los instrumentos, en particular el molinete de copas.
 - 7 Sedimentación o erosión. La sección de aforo puede cambiar severamente ya sea por erosión o por sedimentación. En ocasiones, esto obliga a su reubicación o a la suspensión de su operación.
 - 8 Mantenimiento Inadecuado. La falta de mantenimiento puede afectar la precisión de las mediciones y, en algunos casos, sacar de operación la estación.
 - 9 Falta de interés en la política hídrica. Esto parece ser un factor muy relevante, dada la información de instalación de nuevas estaciones y la pérdida de éstas.

Finalmente, al igual que en el caso de las estaciones climatológicas, al hablar de obsolescencia de la red climatológica se deben tener en mente todos los factores anteriores. En México, sin duda, los tres primeros factores son los más importantes.

Sistema de extracción y análisis de información de las estaciones climatológicas e hidrométricas mexicanas

Dentro del proceso de ejecución del proyecto, aún cuando no se estaba considerado inicialmente entre los entregables del mismo, se desarrollaron dos sistemas de acceso, extracción y análisis de la información existente en las bases de datos climatológicas e hidrométricas. Los sistemas de análisis se generaron utilizando los entornos de programación R (en mayor medida) y Python, mismos que explotan las bases de datos oficiales que mantiene la Comisión Nacional del Agua, disponibles a través del Sistema de Información Nacional del Agua (SINA) y el Servicio Meteorológico Nacional. Las fuentes de datos se pueden acceder desde <https://sih.conagua.gob.mx/climas.html> para el caso de la información climatológica y <https://sih.conagua.gob.mx/hidros.html> para el caso de la información hidrométrica. También se utilizó el portal <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>, así como <https://sinav30.conagua.gob.mx:8080/SINA/?opcion=SIH>. Se desarrolló un script para cada tipo de información, mismos que se resumieron en archivos en formato *html* para mostrar la información, con distintas opciones, en un tipo *dashboard* como tablero de visualización. En las **Figuras 4.14 y 4.15** se muestran un fragmento del inicio de los tableros.

Figura 4.14 Inicio del tablero de visualización para el caso de la red climatológica en México.



Dentro del tablero de visualización, las opciones disponibles son:

- 1. Indicadores de operación diaria y edad promedio de estaciones. Aquí se puede desplegar por entidad federativa o por organismo de cuenca mostrando el porcentaje de operación diaria y la edad promedio en años (ordenable alfabéticamente en ambos sentidos).
- 2. Antigüedad de las estaciones. Se muestra graficamente el histograma de la distribución de la antigüedad por rango de edad a cada diez años. Esta información se muestra también en forma tabular incluyendo porcentajes. Todos los campos de la tabla pueden ordenarse de mayor a menor y viceversa.
- 3. Evolución de incorporación anual de estaciones. Se muestra en diagrama de barras el número de estaciones incorporadas por año.

4. Estaciones activas por año. En este apartado se muestra en diagrama de barras la evolución del número de estaciones activas por año para todo el registro (a nivel nacional). También se incluye esta misma información para cada entidad federativa y para cada organismo de cuenca.

El *script* para el caso de la red climatológica se muestra actualizado con la base de datos a mayo de 2025, mientras que para el caso de la red hidrométrica, la base de datos está considerada hasta julio de 2025. Las gráficas incluidas en los apartados 4.1 y 4.2 de este mismo capítulo fueron extraídas del tablero de consulta descrito. El análisis detallado de esta información bien puede servir como una base para evaluar las aplicaciones de inversiones a fin de recuperar, modernizar o ampliar las redes de medición tanto climatológica como hidrométrica.

Figura 4.15 Inicio del tablero de visualización para el caso de la red hidrométrica en México

Infraestructura hidráulica en México II

por Víctor Manuel Espinoza Juárez

actualizado al 10 de julio de 2025

Análisis de estaciones hidrométricas en México

Trabajé en R con la información proveniente del **Servicio Meteorológico Nacional (SMN)** para realizar un análisis de las estaciones hidrométricas disponibles en formato digital, con una fecha de corte al 3 de abril de 2025.

El propósito de este análisis inicial es **identificar patrones relevantes** sobre la **operación histórica de las estaciones** y el tiempo promedio en el que han estado activas. Esta exploración busca generar hallazgos preliminares que permitan evaluar la **utilidad de este tipo de análisis para fines de diagnóstico, planeación y priorización de infraestructura** en materia hídrica y climática.

1. Indicadores de operación diaria y edad promedio de estaciones hidrométricas

A continuación, se presentan los indicadores clave derivados de las series de tiempo procesadas. Se calcularon con base en los periodos en los que cada estación tuvo registros disponibles, y se considera como **operación diaria** la presencia de datos en por lo menos una fila de la columna de Gasto(m³/s). Además, se calcula la **edad promedio de las estaciones** a tres niveles: nacional, estatal y por Organismo de Cuenca. Esta edad se determina como el tiempo transcurrido entre el primer día con registro disponible y la última fecha en la que se reportó un dato en cada estación.

Promedio estatal de la operación diaria

Search:

Estado	Operación diaria (%)	Edad promedio (años)
Coahuila de Zaragoza	53	70
Ciudad de México	33	67
Tlaxcala	43	67
Guerrero	64	59
Querétaro	56	58
Michoacán de Ocampo	45	57
Aguascalientes	31	55
Chihuahua	47	55
Zacatecas	35	54
Baja California	10	52
Morelos	71	52

Comentarios finales sobre infraestructura de medición

Con respecto a la infraestructura de medición hidroclimatológica, particularmente de las redes de estaciones climatológicas convencionales y de estaciones hidrométricas, se puede afirmar que México cuenta con un registro histórico que trasciende los cien años. La evolución temporal tanto de las estaciones instaladas (nuevas) como de las activas ha tenido altibajos. Sin embargo, se observa una clara disminución en el número de estaciones a partir de mediados de la década de los 1980s.

En el ámbito nacional, la edad promedio de las estaciones climatológicas convencionales es de 53 años mientras que para las estaciones hidrométricas es de 50 años. Este lapso de tiempo ha sobrepasado, con toda seguridad, la vida útil de la infraestructura, por lo cual es altamente probable que se les haya brindado algún tipo de mantenimiento, restauración, rehabilitación o reemplazo. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto no pudimos tener acceso o al menos conocer de la existencia de archivos históricos sistemáticos sobre el mantenimiento de ambos tipos de estaciones.

De aquí se desprende la urgencia de contar con una base de datos formal con esta información, para así poder estar en conocimiento de la calidad con que se están obteniendo los datos. Si bien tanto las estaciones climatológicas convencionales como las hidrométricas cuentan con instrumentos relativamente sencillos, es necesario al menos llevar un programa de verificación y calibración de los mismos. Por otro lado, es preciso mencionar que del análisis de las bases de datos se han detectado inconsistencias no solo de datos sino incluso de nomenclatura y también una gran porosidad (huecos de información), que sin duda restan calidad al grueso de la información. **Arganis Juárez et al (2010)** ponen de manifiesto la importancia de incrementar la red de estaciones climatológicas e hidrométricas a fin de tener información oportuna de la variación de las lluvias y los escurrimientos en las distintas zonas del país, así como continuar con el desarrollo y la calibración de modelos para pronosticar precipitaciones y escurrimientos y desarrollar mapas de peligro por inundaciones en toda la república. Reconociendo el valor de la información primaria, fuente para muchos de los estudios hidrológicos e hidráulicos, fortalecer la red es una de las prioridades en el sector

4.2 Presas

4.2.1 Información básica

Dentro de los diferentes tipos de infraestructura hidráulica las presas destacan por su relevancia. La acepción común es que una presa es una barrera construida en forma transversal al eje de un río o una corriente, con el fin de contener, almacenar o desviar el agua. Estrictamente hablando, la presa es el conjunto de elementos que conforman en forma completa dicha infraestructura. Los componentes principales son la cortina, el embalse y las obras accesorias (excedencia, toma, etc.). El propósito principal de una presa puede ser el abastecimiento de agua con fines potables, el riego agrícola, la generación de energía eléctrica o el control de inundaciones. Usualmente, las presas y los embalses a los

que dan lugar sirven a múltiples propósitos como algunos o todos los anteriores además de otros secundarios como la recreación, la pesca y la navegación.

El SINA incluye información detallada sobre las principales presas del país, aunque este detalle depende de qué sección en particular se consulta. Si se entra a través de Monitoreo de Presas, cuyo enlace aparece en la parte superior derecha del portal, aparece un Reporte con información al día sobre los siguientes aspectos:

1. Nombre de la presa
2. Nombre común
3. Organismo de cuenca
4. Entidad federativa
5. NAME Elevación (msnm)
6. NAMO Almacenamiento (hm^3)
7. NAMO Elevación (msnm)
8. NAMO Almacenamiento (hm^3)
9. Almacenamiento actual (hm^3)
10. % de llenado actual (con datos actualizados en forma irregular).

Además de este Reporte, el cual se puede descargar vía PDF o CSV, el SINA también permite una visualización gráfica de las presas en un mapa que se puede usar muy amigablemente. Para cada una se cuenta con información muy útil, como el uso o usos de la presa, altura y elevación de la cortina, así como la corriente y región administrativa en la que se ubica. La pestaña Monitoreo de Presas también despliega una gráfica que contiene el almacenamiento total actual y al NAMO en presas por entidad federativa. Un dato muy importante y que no se presenta en el Reporte ya mencionado, es el año de inicio de operación de la presa. Para obtener esta información es necesario extraerla presa por presa de los mapas de ubicación de éstas. Este dato es muy valioso para medir la vida útil y envejecimiento/obsolescencia de esta infraestructura. En este sentido, una recomendación es incluir esta información en el Reporte.

4.2.2 Sistema de Seguridad de Presas

El sistema de seguridad de presas de la CONAGUA (<https://presas.conagua.gob.mx/>) contiene un total de 6,733 registros (datos al 11 de septiembre de 2024). La misma institución, a través de la publicación *Estadísticas del Agua en México*, indica que la capacidad de almacenamiento de las presas del país es de aproximadamente 150 mil hm^3 . Asimismo, debido a su importancia regional y representar el 85% del almacenamiento nacional, se monitorea en forma semanal el estado de 210 presas principales (**CONAGUA, 2024b**). En el sistema de seguridad de presas es posible, entrando a cada registro, extraer la siguiente información:

- Ubicación
- Propósitos de la obra
- Uso del agua
- Cuenca de escurrimiento

- Cortinas
- Galerías
- Diques
- Vertedores
- Niveles del vaso
- Gastos de diseño
- Obras de toma
- Otros desfogues
- Cauce aguas abajo

En la información general de cada presa y embalse se consigna el año de construcción y también si se ha tenido registro de alguna modificación mayor. Por lo que respecta a la ubicación de las presas principales, en la **Tabla 4.3** se presenta un resumen con datos agrupados por región geográfica, y en el **Anexo Digital 4** se muestra la información completa. De la información se destaca a la región centro como la que presenta mayor densidad de presas (105) con 0.315 presas por cada mil kilómetros. Le sigue la región norte con 78 presas y una densidad de 0.069 presas/1000 km², y finalmente la región sur con solo 27 presas y una densidad de 0.054 presas por cada mil kilómetros cuadrados.

Tabla 4.3 Principales presas por región en México, 2024 (septiembre)

Region	No. Presas	Área (km2)	No. Habitantes	Densidad (por 1000 km ²)	Densidad (por 100,000 hab)
Centro	105	333,292	60,538,615	0.315	0.173
Norte	78	1,124,606	30,194,855	0.069	0.258
Sur	27	503,776	35,372,362	0.054	0.076
Nacional	210	1,961,674	126,105,832	0.107	0.167

Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (2024b)

En relación con la densidad, medida como número de presas por cada cien mil habitantes, la región norte presenta el valor más alto, con 0.258, seguida de la región centro con 0.173 y la región sur, que alcanza apenas 0.076. La región norte supera por mucho a la densidad nacional (con una densidad de 0.167) y más aún a la región sur. Esto muestra una brecha Norte-Sur en la capacidad de almacenamiento de agua, lo cual resulta paradójico, ya que la primera es de naturaleza árida y semi-árida, y de menores precipitaciones.

Sin embargo, por variadas razones estas cifras deben analizarse con cuidado. La existencia de presas y sus vasos de almacenamiento están relacionados con la viabilidad en corrientes superficiales, la oferta del escurrimiento y la necesidad de regular el flujo, así como el uso principal del embalse. Por ejemplo, en el sur las presas son principalmente hidroeléctricas, en el centro se conjuntan las hidroeléctricas con las de almacenamiento, mientras en el norte son principalmente de almacenamiento y regulación. Este último tipo está relacionado primordialmente al abastecimiento de agua con fines agrícolas y público urbano. Por región

hidrológico-administrativa, la región VIII Lerma-Santiago-Pacífico es la que tiene la mayor infraestructura con 73 presas.

4.2.3 Obsolescencia de las presas, mantenimiento y rehabilitación

Contar con estadísticas sobre la vida útil de las presas es muy importante, aunque no es una tarea sencilla. La información está disponible solo que, como ya se mencionó, extraerla es un ejercicio muy costoso, especialmente en términos del tiempo requerido (y, claro, al final también lo es financiero). No obstante que las presas cumplen una función económica y social fundamental, el país le dedica recursos muy limitados a su conservación. Esto se traduce en afectaciones a las actividades económicas – de la agricultura a las ciudades – y a las poblaciones que dependen de ellas para el consumo de agua. No es infrecuente que se tengan fallas en las cortinas, en los diques o en las obras de toma de las presas. Lo anterior se agrava ante la obsolescencia de estas obras, que, a su vez, debería forzar al Estado a invertir en su operación adecuada, reduciendo las necesidades de rehabilitación. Como se asienta muy al principio de esta contribución, se debería incluso hablar de conservación – y no de rehabilitación. Esto alargaría la vida útil de esta infraestructura. Un gran número de presas ha rebasado ya esta vida útil.

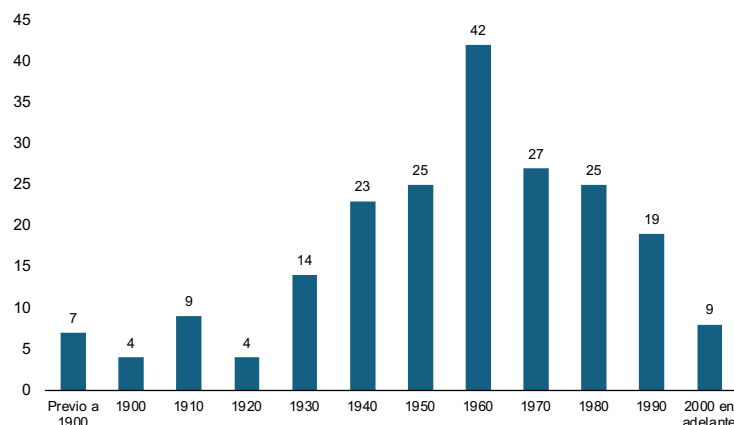
El **Anexo Digital 4**, con datos de 2025 (abril), contiene los datos básicos de las 210 principales presas del país, las cuales representan el 65 por ciento del almacenamiento total. Entre la información presentada se encuentra el nombre de la presa (y también su nombre común), la entidad federativa, y, después de arduo trabajo para su extracción del SINA y del Sistema de Seguridad de Presas, el año de construcción. Es sorprendente que, si bien son pocas, se tengan funcionando presas que vienen del siglo XIX e incluso antes. Es claro que hay vasos de almacenamiento contruidos desde hace varias décadas.

Esto se aprecia más claramente en la **Figura 4.15**, la cual contiene el número de almacenamientos previamente a 1900 (siete) y del año 2000 en adelante. Entre 1900 y 1930 entraron en operación 17 presas. En 1930 el número fue de 14, y de 23 en 1940. Un número similar corresponde a 1950. De 1960 vienen 43 de los vasos de almacenamiento actuales. En los 20 años que van de 1970 a 1990 se incorporaron 71 presas. Del año 2000 en adelante se tienen siete nuevos almacenamientos. Estas cifras indican que las presas del país se han avejentado.

Si bien no se cuenta con información actualizada y verificada, es de suponer que en general la infraestructura de presas recibe un muy limitado mantenimiento, por lo que las necesidades de rehabilitación y reemplazo son grandes. Si bien el portal de seguridad de presas proporciona elementos en este sentido, falta una sistematización de la información, además de lagunas en las bases de datos. Además, es muy difícil encontrar registros de los recursos financieros destinados a estos fines. En la **Figura 4.16** se muestra el histograma con la edad de las 210 principales presas en México. Se observa que 118 presas, el 56% del total, tienen edades entre 51 y 100 años y el 28% presentan edades de entre 31 y 50 años. Si se considera una vida útil de 50 años, el 68% de las principales presas

en nuestro país ha sobrepasado ese umbral. El promedio de edad de esta infraestructura estratégica para México es de 67 años. La mediana de las edades es de 61 años, lo cual indica que la mitad de las presas principales supera esa edad.

Figura 4.15. Número de presas construidas en México por década (de las 210 principales), adelante (Datos a abril de 2025).

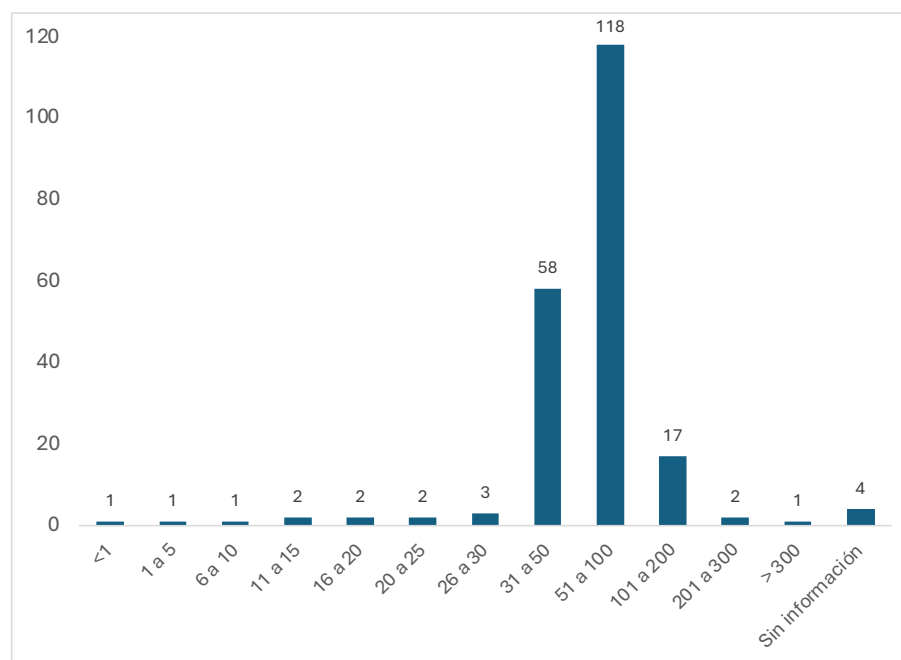


Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA. Sistema de Seguridad de Presas. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx

La Figura 4.17, con datos a abril de 2025, proporciona información sobre los trabajos de reparación y/o modificaciones realizadas a las presas y que han sido registrados en la base de datos del Sistema de Seguridad de Presas. Lo anterior se aplica a 105 embalses. También ocurre que sí se han llevado a cabo tareas de mantenimiento y/o modificación, pero no se especifica cuándo se llevaron a cabo. En 107 presas no hay datos de que haya habido alguna actividad de conservación de la infraestructura. En los últimos 20 años solo aparecen registros de reparaciones para 30 presas.

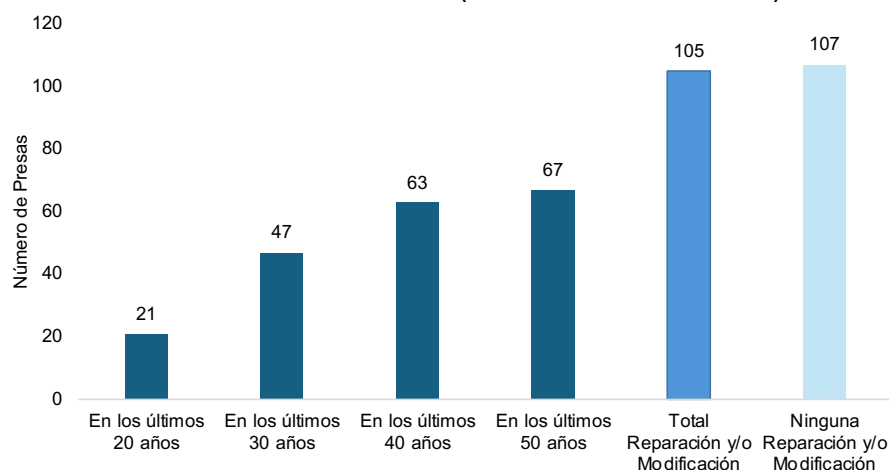
Al final del día, la limitada información disponible sugiere que el envejecimiento de la infraestructura de presas encuentra una correspondencia muy pequeña con su conservación. Ante la significancia de esta infraestructura para el desarrollo económico y social, debería resultar ineludible contar con mayor y mejor información sobre su obsolescencia y conservación, enviando el mensaje correcto de invertir preventivamente en esta infraestructura. Cabe en esta sección un último comentario sobre las dos presas más recientes en el país. La Presa Santa María en Sinaloa, decretada como terminada en 2023 pero aún en fase de inicio de funcionamiento y la presa León (antes presa Libertad) en Nuevo León, que se encuentra muy cerca de ser terminada pero que ya empezó a almacenar agua.

Figura 4.16. Histograma de edades de las 210 principales presas en México (en años, con datos a abril de 2025).



Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA. Sistema de Seguridad de Presas. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx

Figura 4.17. Reparaciones y/o modificaciones de las principales 2010 presas de México en los últimos 50 años (Datos a abril de 2025).



Nota: De los datos recuperados, 23 presas cuentan con notas referentes a su reparación y/o modificación, pero sin especificación de la fecha en la que fueron realizadas.

Fuente: Elaboración propia con base en CONAGUA. Sistema de Seguridad de Presas. https://presas.conagua.gob.mx/inventario/hnombre_presa.aspx

4.2.4 Envejecimiento de las presas

Ahora bien, para aplicar la métrica seleccionada, consistente en el cociente de la edad y la vida útil de diseño, se ha tomado ésta última como 50 años. Este valor es el recomendado por la literatura y es el que utiliza la Comisión Nacional del Agua para los proyectos de nuevos embalses. De la base de datos correspondiente a 212 presas existen cuatro con información poco clara de tal forma que fueron excluidas del cálculo. Así y con la información de edades se tiene registrada, la edad promedio de las 208 presas principales en México es de 67.3 años, claramente superando el umbral de la vida útil. De éstas, 70 (el 33.7%) tienen un factor menor a 1; es decir, aún no han llegado a la edad de su vida útil. El 68.3%, o sea, más de dos terceras partes del total, han superado ya su vida útil y continúan en operación. El factor de envejecimiento promedio alcanza 1.42. En otras palabras, en el promedio nacional, el sistema de las principales presas presenta una edad que es 42% superior a la vida útil de diseño. Este factor asciende a 1.48 si se consideran solo las que ya han sobrepasado dicha vida útil.

4.2.5. Comentarios sobre el caso de Presas

Con respecto al caso de las presas en México, si bien se cuenta con una base de datos que en lo general contiene la fecha de inicio de operación de cada embalse (con lo que se puede determinar su edad), no se tienen registros de su mantenimiento, lo cual hace difícil una evaluación de sus condiciones actuales. Sin duda, el rol del mantenimiento y la rehabilitación en presas es crítico. También lo es la conservación de las cuencas de aportación. Esto en virtud de que es la capacidad de azolves la que primordialmente define la vida útil de la presa. Así en la medida que se reduzca la aportación de sedimentos, mediante acciones de conservación de suelo en las cuencas, la vida útil del embalse podría incrementarse, tal como se mostró en el capítulo 2. Sin embargo, los materiales, específicamente el concreto y el acero son susceptibles a degradación y aunque típicamente su vida útil está entre los 50 y 100 años, con un buen mantenimiento la vida podría incluso superar el siglo de operación.

En presas con cortinas de concreto, las reacciones químicas entre el cemento y los agregados puede provocar, a la larga fisuras y pérdida de resistencia. El contacto con el agua puede también aumentar la porosidad por disolución del hidróxido de calcio del cemento y provocar lixiviación. También los ciclos de temperaturas calientes y frías pueden provocar fisuras. Finalmente, la oxidación del acero, por el contacto con el agua, reduce su capacidad estructural. En presas con cortinas de materiales sueltos, como las de tierra y enrocamiento, los principales problemas son la tubificación, un tipo de erosión interna que genera túneles internos que comprometen a la estructura. Los asentamientos diferenciales o la propia consolidación por peso puede generar grietas y la colmatación de drenes y filtros puede aumentar la presión de poro y reducir la estabilidad. Sin duda, uno de los elementos que más sufren el embate del tiempo son los equipos electromecánicos, las compuertas y las válvulas que suele requerir reemplazo total en unos 30 años en promedio.

En México, la información indica que 138 de las 210 principales presas en el país (el 68%) han superado su vida útil de diseño (establecida en general en 50 años). Siendo el promedio de edad de las 210 presas de 67 años, es claro que el envejecimiento de esta infraestructura debería ser un factor de gran preocupación.

4.3 Acueductos

4.3.1 Información básica

Esta infraestructura de conducción tiene la mayor relevancia pues gracias a ella las ciudades y otros usuarios reciben el agua ya muy cerca de la ubicación donde se requiere. Los acueductos junto con las redes de distribución constituyen el elemento central para llevar el agua a los hogares. Los acueductos enlazan la infraestructura de almacenamiento, como las presas, con los sitios de demanda de regiones y ciudades. Esta información aparece tanto en el SINA como en *Estadísticas del Agua en México Edición 2023 (CONAGUA, 2024b)*, que es la edición más reciente, aunque la relación de acueductos es más grande en el primero de estos portales (80 contra 53, respectivamente). Con información del SINA, a este año se tiene una longitud total de poco más de 3,645 mil kilómetros de acueductos principales, con una capacidad total de 139 m³/s.

En ambas fuentes se incluyen los siguientes datos, referidos en los dos casos a 2018:

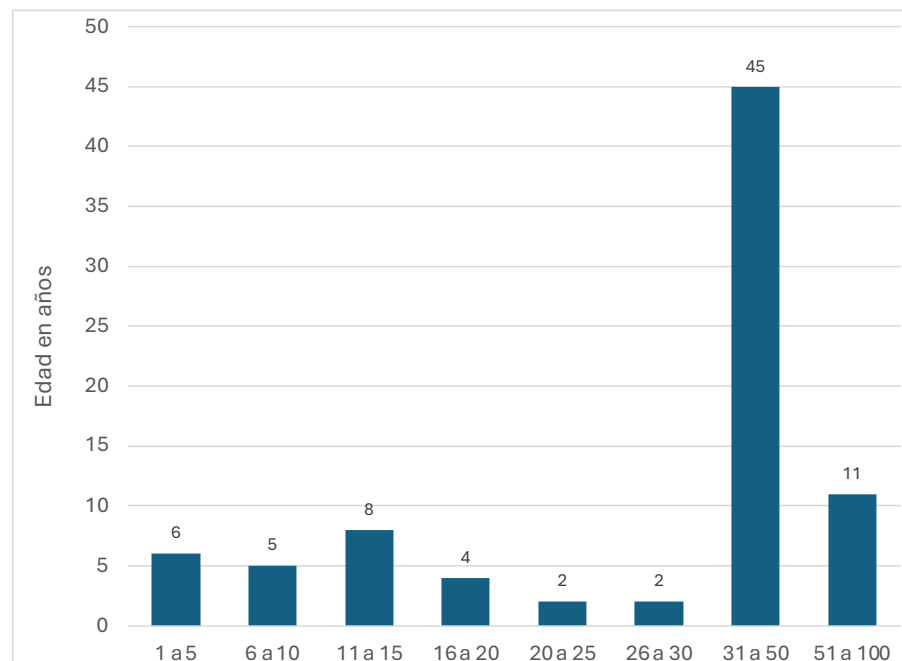
- Nombre del acueducto
- Ciudad a la que abastece
- Organismo responsable de la operación
- Longitud en kilómetros.
- Caudal de diseño en litros/segundo
- Año inicio de operación
- Región hidrológico-administrativa
- Región a la cual abastece

De particular significancia es el año en que el acueducto inició operaciones, pues ello brinda información sobre la vida útil de esta infraestructura y, por lo tanto, de la ineludible necesidad de su mantenimiento y rehabilitación. Es muy importante saber, con información de la base de datos de 80 acueductos principales (**Anexo Digital 4**), que el país tiene 11 con edades que sobrepasan los 50 años. Los acueductos que llevan agua a las tres principales metrópolis tienen entre 30 y 40 años en operación. El país tiene 56 acueductos con más de 30 años de operación y 44 de ellos tiene más de 35 años (**Anexo Digital 4**). El promedio de edad de los 80 acueductos es de 34 años. Por su longitud, son de mencionar el Acueducto Independencia (146 km), el Linares-Monterrey y el Realito (133 km), el Acueducto II en Querétaro (123 km) y el Chicbul-Ciudad del Carmen (122 km).

4.3.2 Edades de los principales acueductos

En la **Figura 4.18** se muestra el histograma de edades de los 80 acueductos principales en México. Es notorio que 56 de las 80 infraestructuras, el 70%, presenta edades superiores a los 30 años. Inclusive, 11 de ellos (el 14%) tiene edades que exceden los 50 años, lo que claramente es mayor que la vida útil de cualquier infraestructura hidráulica. En un poco más de la mitad de los acueductos (44), la edad supera los 35 años, promediando 47.3 años. En general, los 80 acueductos principales en el país tienen una edad promedio de 34.2 años. La antigüedad de los acueductos en conjunto con la vida útil de su diseño se convierte en un grave riesgo para su adecuado funcionamiento. Son conocidas las constantes interrupciones en el servicio de agua a la CDMX, ante las fallas en el sistema Cutzamala y la falta del mantenimiento que se le tiene que dar. En el caso de Monterrey, la crisis en el suministro de 2022 hizo visible que tanto el acueducto de El Cuchillo – San Roque como el Acueducto Linares (Cerro Prieto) requerían mantenimiento urgente.

Figura 4.18. Histograma de las edades de los 80 principales acueductos de México, 2025 (mayo).



Fuente: Elaboración propia con base a información del SINA 3.0 (2025)

4.3.3 Vida útil de líneas de conducción

Resulta evidente que la edad de los acueductos en México, al menos los más importantes, es un tema de relevancia fundamental. El hecho de que más de la mitad de ellos supere los 35 años, sugiere la necesidad de un ejercicio de revisión y la aplicación de un plan de monitoreo más estricto. Esto porque la edad promedio ya se encuentra cerca del periodo de vida útil con el que normalmente se diseñan las líneas de conducción. Hay en particular once obras cuya edad supera los 50 años que se encuentran en un mayor riesgo de falla.

Ahora bien, la falta de registros de mantenimiento o acciones de conservación induce una variable más en la incertidumbre de la integridad o al menos funcionalidad de las líneas de conducción. Por otro lado, el tipo de material de la tubería es, sin duda, otro de los factores que debe tomarse en cuenta para que esta información en conjunto de la edad pueda proporcionar elementos más sólidos para conocer mejor el riesgo de falla. De entre los materiales, se puede considerar, como vida útil la mostrada en la **Tabla 4.4**. Dependiendo del material, la duración teórica máxima puede estar entre los 30 y los 100 años.

Sin embargo, es importante mencionar que la vida útil real de un acueducto puede variar significativamente debido a factores como la calidad de la instalación, las condiciones del suelo, la calidad del agua transportada, la presión de operación, el mantenimiento y la exposición a factores externos. Como factores condicionantes se encuentran por ejemplo:

- **Condiciones Ambientales:** La agresividad del suelo (pH, humedad, presencia de sulfatos), la calidad del agua (pH, corrosividad, presencia de cloro), la temperatura y la presión del sistema influyen enormemente en la vida útil.
- **Calidad de Fabricación e Instalación:** Una mala calidad del material o una instalación deficiente (malas uniones, daño durante la instalación) pueden reducir drásticamente la vida útil esperada.
- **Clima:** Temperaturas extremas o ciclos de congelación/descongelación pueden afectar ciertos materiales.
- **Mantenimiento:** El monitoreo regular, la detección temprana de fugas y el mantenimiento adecuado pueden prolongar la vida útil de cualquier tubería.

Con base en esto, solo en un sentido meramente teórico se pueden considerar los tiempos mencionados en la **Tabla 4.4**, como los periodos esperados de vida de esa infraestructura. El Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de la CONAGUA (MAPAS) indica en su Libro 4 “Datos Básicos para Proyectos de Agua Potable y Alcantarillado (MAPAS Libro 4, 2025), que una línea de conducción se diseña para un periodo de 20 a 30 años y que su vida útil se extiende entre los 30 y 40 años. Con base en esta recomendación, se tiene un problema serio de obsolescencia de los grandes acueductos en México.

4.3.4 Envejecimiento de principales acueductos en México

Con relación al indicador de envejecimiento propuesta en el presente estudio, se tiene que la edad promedio de los principales acueductos en el país asciende a 34 años. Si se considera una vida útil de 40 años la métrica establecida, designada como la edad sobre la vida útil alcanza en promedio 0.85, lo cual significa que en el promedio nacional no se ha alcanzado el umbral de vida útil. Sin embargo, de los 32 casos que ya han superado la vida útil, el indicador alcanza 1.30. En estos casos, en donde la edad se encuentra 30% por encima de la vida útil, la atención se vuelve urgente.

Tabla 4.4 Vida útil de tuberías en función del material

Material de la Tubería	Vida Útil Promedio (Años)	Notas y Factores Influyentes
Acero (Carbono)	30 - 50	Susceptible a la corrosión si no está revestido o protegido adecuadamente. La vida útil puede ser menor en ambientes corrosivos o con aguas agresivas.
Acero Inoxidable	50 - 100	Excelente resistencia a la corrosión. Mayor costo inicial, pero durabilidad muy alta si el grado es adecuado para el entorno.
Cobre	50 - 100	Muy duradero y resistente a la corrosión en la mayoría de las condiciones de agua. Popular para instalaciones residenciales y comerciales. Puede verse afectado por agua muy ácida o alcalina.
Hierro Fundido (Gris)	75 - 100	Material tradicional con muy buena durabilidad, especialmente si tiene revestimientos internos y externos. Sin embargo, puede ser quebradizo.
Hierro Dúctil	70 - 100	Una mejora del hierro fundido, con mayor resistencia y flexibilidad, y buena resistencia a la corrosión con revestimientos. Ampliamente usado en redes de agua potable.
PVC (Cloruro de Polivinilo)	50 - 100	Muy común, ligero y resistente a la corrosión y la abrasión. Su durabilidad puede verse comprometida por la exposición prolongada a la luz solar UV o temperaturas muy altas si no está diseñado para ello.
HDPE (Polietileno de Alta Densidad)	50 - 100	Flexible, resistente a la corrosión y a la abrasión. Ideal para instalación sin zanjas y para áreas sísmicas. Su resistencia a los rayos UV es buena si tiene aditivos.
PPR (Polipropileno Random)	50	Comúnmente usado en sistemas de agua caliente y fría en edificios. Resistencia a la corrosión y a altas temperaturas.
Concreto (Cemento)	50 - 100	Usado en tuberías de gran diámetro. Muy duradero, especialmente si es hormigón pretensado. La resistencia al ataque químico puede variar.
Fibrocemento (Cemento de Asbesto)	50 - 70	Material histórico; su uso es obsoleto o prohibido en muchos lugares debido a preocupaciones de salud relacionadas con el asbesto.

Fuente: Recopilación de internet (AWWA, ASCE, PPI, TPPFA)

4.3.5 Comentarios sobre el caso Acueductos

En lo referente a acueductos y con base en la información de los 80 acueductos principales, se encuentra que hay 14 con 50 años o más, 31 con 40 años o más y 55 con 30 años o más. El promedio de edad de los 80 acueductos, calculado en 34 años sugiere que también el envejecimiento de los grandes acueductos en México es un tema de mediana consideración en general. Sin embargo, en 31 de los 80 casos, es decir el 38.7% se ha igualado o sobrepasado ya la vida útil, teniendo incluso dos casos en cuya edad duplica la citada vida útil, Riito en Sonora y San Agustín Etla en Oaxaca. Estos casos se deben revisar cuidadosamente, también a la luz de los registros de mantenimiento.

4.4 Plantas Potabilizadoras

4.4.1. Información básica

La potabilización es un proceso indispensable para que el agua suministrada a las poblaciones tenga la calidad especificada en la normatividad establecida para ello y pueda ser consumida por el ser humano. Esto se reconoce bien en los *Reportes de la Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento* siendo la edición 2025 la más reciente y disponible en https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1044537/DSAPAS_2025.pdf, y en las otras fuentes de información que son referentes sobre la infraestructura de agua y que se analizan en este estudio. En este Reporte se menciona que la potabilización consiste en eliminar (o disminuir) sustancias que resulten tóxicas para las personas, como el cromo, plomo, zinc, así como algas, bacterias y virus. A fin de que la población reciba agua de calidad que garantice su salud, la CONAGUA junto con gobiernos estatales y municipales, construyen, rehabilitan y operan las plantas potabilizadoras. En este proceso una figura relevante es la Secretaría de Salud quien promueve la aplicación de las normas oficiales que regulan los estándares mínimos de la calidad de agua para consumo humano. En este sentido es importante mencionar la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, la cual debe cumplir todo Organismo Operador para el agua que conduce en sus redes de distribución.

Resulta importante comentar que existe otra publicación de la CONAGUA denominada Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación – diciembre de 2024, mismo que está disponible en la dirección electrónica: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1029790/Inventario_Nacional_PPyPATAR_2024.pdf. Sin embargo, la información contenida en este reporte no coincide completamente con la del Reporte de la Situación del Subsector mencionado, aún cuando ambos documentos indican que la información tiene como fecha de corte diciembre de 2024. En lo subsecuente el análisis se realiza con la información del Reporte de la Situación del Subsector que es el documento con fecha más reciente. Este reporte presenta una serie de 1993 a 2024, con datos para el número de plantas, capacidad instalada y caudal tratado.

Los datos de 2024 también incluyen la entidad federativa correspondiente. En este año se tenían 1,000 plantas municipales, con una capacidad instalada de 156.984 m³/s y un caudal tratado de 114.597 m³/s, es decir, las plantas funcionando a un 73% de su capacidad. Por su potencial de potabilización destaca el Estado de México, Jalisco, Tamaulipas y Nuevo León. Los procesos más utilizados para la potabilización son diversos, pero destacan la clarificación convencional con sedimentador, la ósmosis inversa (con o sin suavizador) y la filtración directa. Estos procesos, en conjunto, se utilizan en el 92.4% del total de plantas.

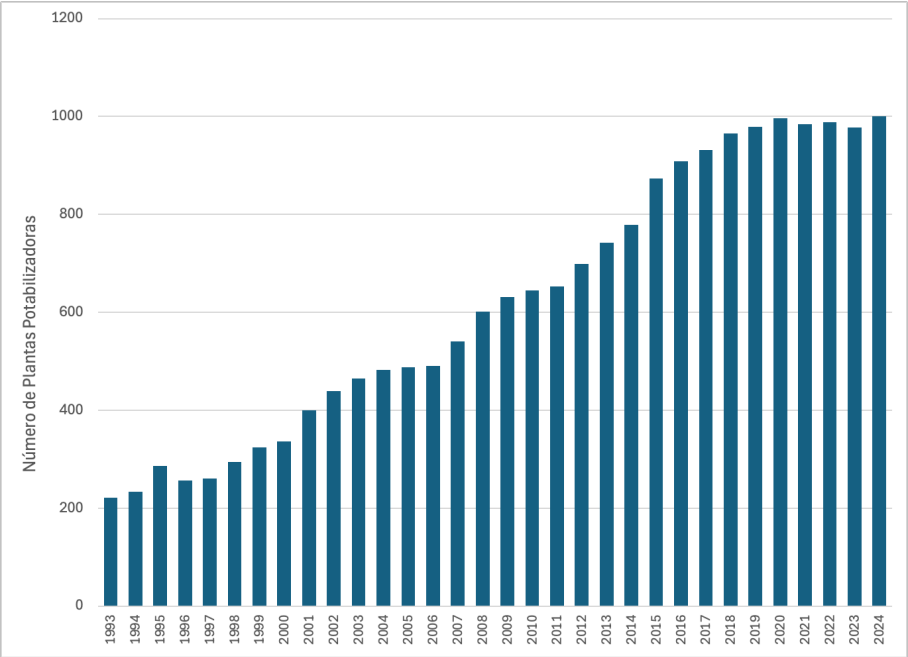
4.4.2 Edad de las plantas potabilizadoras

A la fecha de integración de este reporte fue difícil encontrar una base de datos pública y unificada sobre la fecha de construcción o la fecha de inicio de operaciones de las plantas potabilizadoras en México, a partir de la cual se pudiera determinar las edades. Como lo indican los párrafos anteriores, las publicaciones (generalmente anuales) se centran más en el estado operativo (activas e inactivas) y el caudal tratado (con relación a la capacidad instalada) que en la antigüedad de los activos.

En la **Figura 4.19** se muestra la evolución de la entrada en operación de las plantas potabilizadoras en el país. La serie inicia en 1993 con 222 plantas y termina en 2024 con 1,000 plantas. En general se muestra un crecimiento, notando tres años en los que el número disminuyó. De 1995 a 1996 se perdieron 30, de 2020 a 2021 hubo 13 menos y de 2022 a 2023 disminuyó en diez. El reporte indica que, de acuerdo con la información proporcionada por los organismos responsables de la operación de las plantas, las principales causas por las que se reporta plantas fuera de operación son: el 4.54% de la capacidad se sitúa en infraestructura que presentan un déficit en la fuente de abastecimiento, caudal que fue reemplazado por otras plantas; 72.72% por falta de mantenimiento; 9.09% rehabilitación, ampliación o reingeniería de los procesos y 13.65% por obsolescencia. Con base en esa información se infirió una serie con las edades de las plantas. Esa información se muestra en la **Figura 4.20**. Desafortunadamente no es posible determinar la edad precisa de al menos 222 plantas. Otra forma de hacer una aproximación de las edades podría hacerse, deduciendo una “edad” y el estado de la infraestructura basándose en las inversiones históricas en el subsector, así también como por el proceso manejado en cada planta, aunque seguirá siendo un estimado grueso del tema.

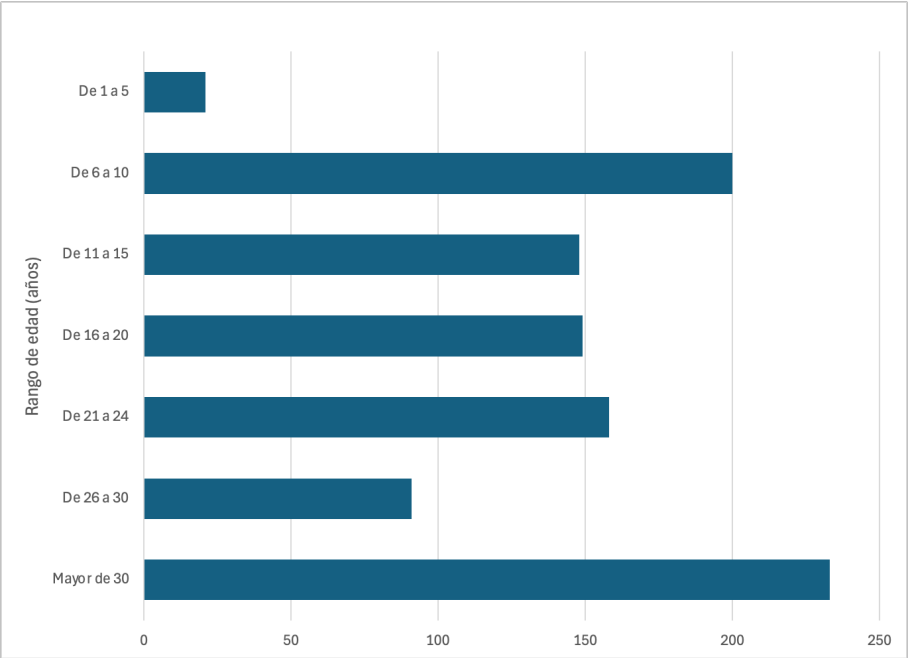
Según el reporte de la situación del subsector, de las 1,000 plantas en el inventario, entre el 25 y el 30% están operando por debajo de su capacidad o definitivamente fuera de operación. Las causas principales de esta condición es la falta de presupuesto para operación y mantenimiento (sobre todo en los equipos electromecánicos) y la obsolescencia tecnológica, puesto que muchas de las plantas fueron diseñadas para remover contaminantes que eran importantes hace muchos años, lo cual no necesariamente coincide con la actualidad.

Figura 4.19. Evolución de las Plantas Potabilizadoras en México a 2024.



Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (2025)

Figura 4.20. Edades de las plantas potabilizadoras en México a 2024.



Fuente: Elaboración propia con información de CONAGUA (2025)

Desde el punto de vista de los procesos usados en la plantas potabilizadoras se pueden reconocer ciertos periodos asociados con la preferencia en la tecnología. Así, por ejemplo, entre 1970 y 1990 se usó mucho la clarificación convencional con sedimentación. El 38% de las plantas en el país tienen ese proceso por lo cual es muy posible que provengan de ese periodo. Entre 1990 y 2010 se dio el surgimiento importante de plantas medianas y pequeñas con tecnologías patentadas y sistemas modulares. Este periodo se puede asociar más a los sistemas de ósmosis ya sea con suavizador o sin él. El 42% de las plantas del inventario corresponden a este proceso por lo cual podemos deducir que provienen de esa época y que tienen entre 15 y 35 años de antigüedad. A partir de 2010 se encuentran tecnologías de remoción de contaminantes específicos, tales como metales pesados, arsénico o flúor y también las plantas desalinizadoras, muchas de las cuales trabajan también con procesos de ósmosis.

Ahora bien, las plantas construidas antes de 2010, que son seguramente la mayoría, no fueron diseñadas para cumplir con los nuevos estándares de las NOM-127. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. Publicada el 2 de mayo de 2022, en varios parámetros, pero específicamente en arsénico y flúor. Esto obliga a pensar en un reacondicionamiento o reingeniería de la planta mediante el diagnóstico estructural de la obra civil, particularmente los tanques sedimentadores y la consideración de nuevos trenes de tratamiento (procesos unitarios) a los existentes.

4.4.3 Envejecimiento de las plantas potabilizadoras

Con la información recopilada, con un registro que inicia en 1993 se puede determinar el grado de envejecimiento de las plantas potabilizadoras. El promedio de edad de estas infraestructuras es de 19.9 años (asumiendo que las 222 registradas en 1993 tienen todas una de edad de 32 años; lo cual no es necesariamente cierto). El factor de envejecimiento de edad sobre vida útil, considerando esta última como 40 años resulta en promedio de 0.54, lo cual se puede interpretar como que, a nivel nacional, las plantas potabilizadoras apenas sobrepasan la mitad de su vida útil. A la luz de este breve análisis se puede inferir que alrededor de un cuarto de las plantas potabilizadoras en México pudo haber sobrepasado ya su vida útil o estar cerca de hacerlo (más de 30 años de edad). Esto aunado a la falta de inversión en mantenimiento y a la actualización de la normatividad, establece condiciones en las cuales, la revisión, adecuación, rehabilitación o ampliación de las plantas potabilizadoras en el país es un tema de política pública que debe ser atendido.

4.5 Plantas de Tratamiento

4.5.1. Información básica

La infraestructura de tratamiento de aguas residuales es crucial para el adecuado saneamiento del agua y las posibilidades de su reúso por distintos usos y usuarios. En los últimos años el país ha hecho esfuerzos para construir y operar plantas de tratamiento, a pesar de severas restricciones financieras de las entidades gubernamentales. Las

industrias tienen también un número importante de plantas. La información que la CONAGUA publica, a través de sus diferentes portales y publicaciones es valiosa en este sentido. También se tienen, como sería de esperar, áreas de oportunidad. Al igual que en otros subsistemas, no es de fácil adquisición la información referente al año de construcción o inicio de operación, necesaria para determinar la edad de la infraestructura. Saber sobre esta es de la mayor significancia, ante las crecientes necesidades de mayor tratamiento, reúso e intercambio de aguas de primer uso por agua tratada. No obstante esta limitación, se perciben problemas de financiamiento para la operación, el mantenimiento y la reingeniería de las plantas. Es decir, si solo se presupuesta la construcción y no el mantenimiento y rehabilitación de esta infraestructura, es normal que se tenga un amplio número de plantas que no están operando o que lo hagan deficientemente.

Datos del SINA muestran que a 2023 (con último acceso a la plataforma en diciembre de 2025) se tenía un catálogo general de 2,928 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), las cuales tienen una capacidad instalada de 196.443 m³/s y tratan un caudal de 143.568 m³/s. Para cada planta se presenta la siguiente información:

- Codificador de planta
- Nombre de la planta
- Región hidrológica administrativa
- Entidad federativa
- Localidad

Esta base de datos no incluye el caudal tratado por planta sino hasta que se consulta esta información en el mapa de ubicación, lo cual dificulta el proceso de búsqueda. En este mapa, además del caudal tratado, en m³/s, aparece la capacidad instalada, también en m³/s. Los datos de capacidad instalada y caudal tratado son muy importantes, en términos de las posibilidades de incrementar el tratamiento de más volumen. Esto permite apreciar en qué regiones se está cerca (o no) de la capacidad instalada, y poder tomar las decisiones apropiadas con oportunidad, especialmente si ello va a requerir recursos financieros. En algunos casos el caudal tratado está muy cerca de la capacidad instalada.

Como se menciona arriba, sin embargo, esta información más detallada – la capacidad instalada y el caudal tratado – no se presenta en el reporte tabulado, lo que hace muy poco amigable la consulta (al tener que seleccionar planta por planta en el mapa). Información sobre tratamiento de aguas residuales y las plantas para ellos también se presenta en el reporte *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*, siendo la edición 2025 la referencia más reciente, y en el *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación – Diciembre de 2024* de CONAGUA.

De acuerdo con estas referencias, al cierre de 2024 se reportan 2,899 plantas con una capacidad instalada de 194.913 m³/s y un caudal tratado de 143.77 m³/s obteniendo una cobertura del 68.1%. Se hace notar que la capacidad instalada disminuyó respecto a la registrada en 2023. De acuerdo con el reporte, las principales causas por las que las plantas salieron de operación son: falta de mantenimiento (34.5%), problemas de operación

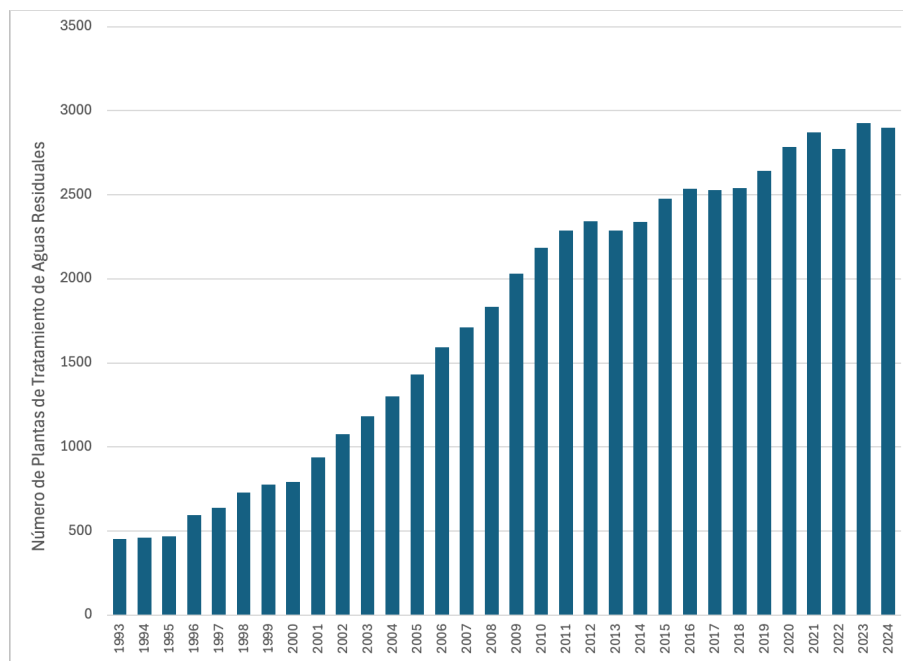
(28.6%), en proceso de rehabilitación o ampliación (24.1%), obsolescencia de la infraestructura (11.4%) y daños por problemas hidrometeorológicos (1.4%).

Por su parte, en el sitio oficial del SINA se reporta una base de datos con un total de 2,928 plantas (a 2023); 29 plantas más que en 2024. También la capacidad instalada y el caudal tratado son ligeramente mayores. Sin embargo, para los fines del análisis presentado en este reporte se ha trabajado con los datos de la *Situación del Subsector* y el *Inventario Nacional*, que contienen datos coincidentes a diciembre de 2024.

4.5.2. Edad de las plantas de tratamiento de aguas residuales

El reporte de la *Situación del Subsector* presenta la evolución de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) municipales de 1992 a 2024 (**Figura 4.21**), aunque presumiblemente son solo las que están en operación. Aun así, de esa información es posible hacer una aproximación de las edades de las infraestructuras. En la **Figura 4.22** se muestra el histograma de edades de las PTARs. La mayor parte de esta infraestructura tiene edades entre 16 y 20 años, aunque hay un número importante con edades mayores de 30 años. Desafortunadamente, con la información disponible no es posible desglosar el rango de mayor edad.

Figura 4.21. Evolución de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México a 2024.



Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación – diciembre de 2024 de CONAGUA

4.5.3. Envejecimiento de las PTARs

Con base en la información recopilada, el promedio ponderado de edad de las PTARs a nivel nacional es de 15 años, aunque existen 461 plantas con edades que superan los 30 años de edad y que están por lo tanto cerca de cumplir su vida útil. El indicador promedio de envejecimiento, calculado como la edad sobre la vida útil es de 0.51, indicando que, en promedio nacional, las PTAR apenas sobrepasaron la mitad de su vida útil.

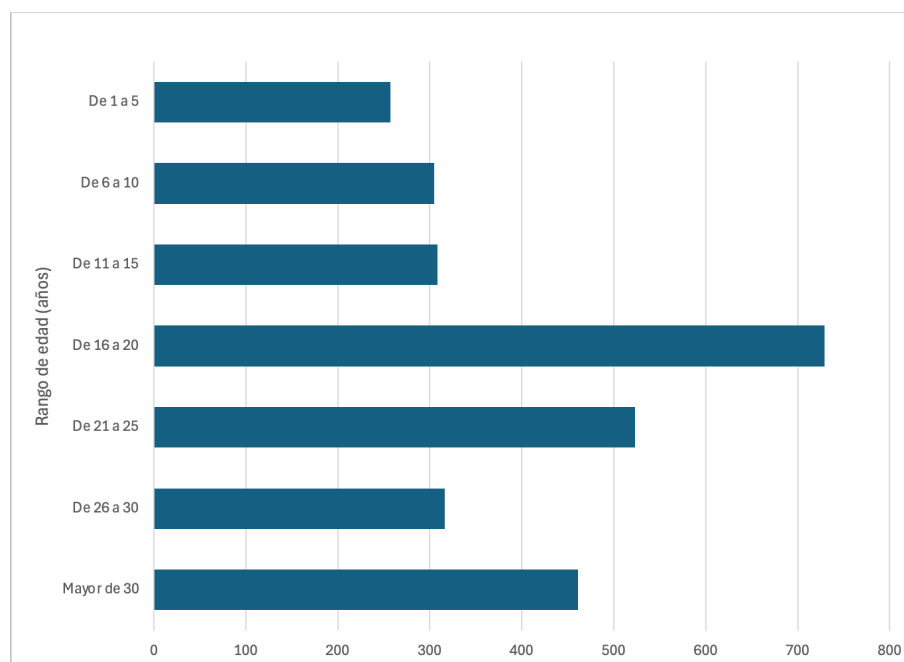
Existe información parcial sobre las PTAR en México que fue posible extraer de la Plataforma digital OLAS (Observatorio Latinoamericano de Agua y Saneamiento), la cual se define como una plataforma de inteligencia de datos crítica para la toma de decisiones estratégicas en el sector. Este repositorio digital centralizado fue creado en 2021 por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en conjunto con socios globales (UNICEF, la Agencia Española de Cooperación - AECID, la Agencia Suiza – COSUDE y Agua y Saneamiento para Todos) para resolver el problema de la falta de datos comparables.

La idea principal es la de monitorear el avance en los ODS (particularmente el ODS 6) en la región LAC (Latino América y el Caribe). La plataforma OLAS contiene un recurso llamado *Inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México*, con datos al 20 de marzo de 2024. Se menciona que, para construir el Inventario, se cruzaron y validaron datos de inventarios nacionales y fuentes internacionales como HydroWASTE mediante imágenes satelitales. Se agregó información adicional para cada planta de acuerdo con los datos disponibles públicamente. La información es de acceso libre para todos los países de la región ALC incluido México. Este recurso se encuentra en <https://olasdata.org/repository/data-detail/17>.

En el caso de la base de datos para México se tienen 2,810 registros, de los cuales solo 389 cuentan con información sobre el inicio de operación, con edades que oscilan entre los 4 y los 69 años. Con esa información, el factor de envejecimiento con datos de la plataforma OLAS es de 0.55, que no difiere mucho del 0.51 estimado con los datos de CONAGUA. Esta base de datos consigna a 31 PTAR con edades mayores de 40 años y por lo tanto con existencia más allá de la vida útil.

Por otro lado, el *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2023* (que se realiza cada dos años), en su apartado de Tabulados Básicos, presenta información sobre las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, por municipio o demarcación territorial según condición de operación. En ese informe, se reportan a nivel nacional 3,440 PTARs de las cuales 2,258 están en operación y 1,182 fuera de operación (el 34.3%). Más aún, se reportan, también a nivel nacional 56 PTAR como haber llegado al fin de su vida útil.

Figura 4.22. Edades de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en México a 2024.



Fuente: Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación – diciembre de 2024 de CONAGUA

4.5.4 Comentarios acerca de las PTAR

Como se muestra en este apartado correspondiente a las plantas de tratamiento, las fuentes de información son variadas y en la mayoría de las ocasiones contienen datos no coincidentes. Las publicaciones de CONAGUA parecen ser las más recientes, aunque también presentar diferencias y no contienen en general datos sobre el inicio de operaciones o la edad de la infraestructura. Ésta se puede encontrar en otras plataformas como INEGI o BID-OLAS. Sin embargo, estas fuentes también presentan huecos. Una razón para ello puede estribar en que, si bien el gobierno federal apoya, a través de diversos programas, la construcción de las PTARs, solo los municipios (y en contados casos, los estados) son los que terminan operando dicha infraestructura, generando así una multiplicidad de fuentes de información generalmente no homogéneas.

En México, aunque la capacidad instalada es alta y se reporta en el orden del 68% referida al caudal recolectado, en realidad si se refiere al caudal total alcanza solamente el 51%. Por otro lado, existe un porcentaje muy grande de plantas que están fuera de operación o son subutilizadas. Muchas de las PTAR fueron diseñadas con tecnologías que utilizan mucha energía eléctrica (como los lodos activados), que los municipios no pueden pagar y en otras el diseño original ya no puede garantizar el cumplimiento de las normas actuales.

En general, en las PTARs se pueden también identificar tecnologías preferentes según la época en que fueron construidas. Así, de 1980 y hasta 1995 se priorizaron los sistemas lagunares, con poca obra civil compleja, pero ocupando grandes extensiones de terreno. Entre 1995 y 2010 se tuvo el auge de los sistemas biológicos basados en lodos activados cuyos costos operativos son altos por la energía eléctrica y el mantenimiento de los equipos electromecánicos y la obra civil. En la época más reciente, digamos de 2011 en adelante, si bien las plantas de lodos activados continúan siendo muy usadas, las tecnologías compactas han tomado importancia (como los reactores biológicos de membranas), aunque éstos sean de operación más compleja y requieran de personal más capacitado.

Otro aspecto importante que subrayar es que en 2021 se actualizó la NOM-001, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en cuerpos receptores propiedad de la Nación. Aunque esta norma se estableció como de entrada en vigor gradual hasta 2027 ya los organismos operadores deben estar trabajando con ello. En la actualización, la norma es más estricta en color y nutrientes (nitrógeno y fósforo) además de que incluyó como nuevo el parámetro de Toxicidad.

La cuestión es que todas las plantas construidas antes de 2020, es decir el 96 % de todas las PTARs no fueron diseñadas con la nueva norma y por lo tanto no están en condiciones de cumplirla. Se requiere entonces una modernización de prácticamente todas las plantas. Esto es, no solo dar mantenimiento necesario sino construir nuevos trenes de tratamiento con procesos terciarios en las plantas ya existentes.

4.6. Resumen de la edad de la infraestructura en México

A manera de resumen, se presenta la **Tabla 4.5**, en la cual se condensan valores de los factores de envejecimiento para las distintas infraestructuras en el ámbito nacional. Es conveniente recordar que un factor de envejecimiento unitario refleja el hecho de que la edad ha alcanzado su vida útil de diseño. Valores mayores que la unidad representan casos en los cuales se deberá poner mucho más atención en las labores de mantenimiento, rehabilitación o sustitución de elementos, en virtud de que ya se ha sobrepasado la vida útil. Esta misma información se puede apreciar en la **Figura 4.23** en donde se ha resaltado el valor unitario del factor de envejecimiento, que se da cuando la edad alcanza la vida útil. En el ámbito nacional se refuerza que el caso de presas es el más relevante.

Es de notar que el problema del envejecimiento de la infraestructura hidráulica a nivel nacional se centra en las presas en primer lugar y en las redes de medición en un segundo término. Como se había comentado, la edad avanzada de las estaciones tanto climatológicas como hidrométricas representan un gran valor, por la longitud de sus registros, pero por otro lado, si no se les ha dado el mantenimiento adecuado o la sustitución de equipos, éstas representan también un problema que debe atenderse. El caso de las presas sí constituye una situación de atención urgente. El indicador sugiere que es necesario emprender acciones de evaluación detallada de esa infraestructura a fin de identificar prioridades de inversión. Los acueductos se enfilan ya, en lo general, hacia el fin de su vida útil, por lo cual en poco tiempo serán también motivo de preocupación.

Finalmente, las plantas tanto potabilizadoras como de tratamiento son las estructuras de menor preocupación en el contexto actual.

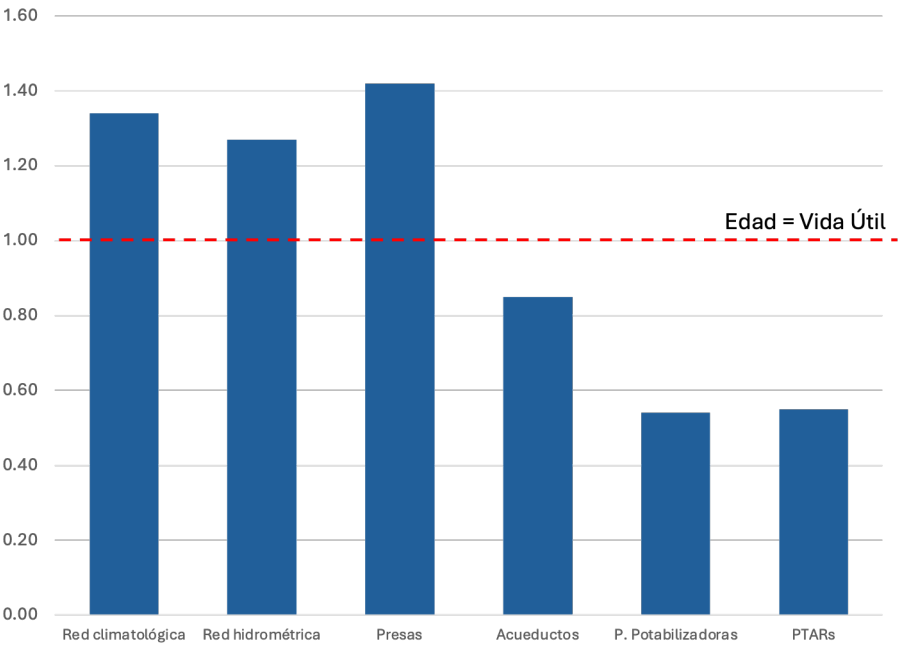
La **Figura 4.24** mapea las condiciones generales del envejecimiento de la infraestructura en México. Como se puede observar, la región deseable en la gráfica se ubica en la parte izquierda superior, en donde se tiene aún un residual positivo de la vida útil y no existen elementos (infraestructura específica) por encima de dicha vida útil. Así por ejemplo, los resultados refuerzan la conclusión de que las Plantas de Tratamiento, en promedio general, corresponden a la infraestructura de menor preocupación, seguida por los acueductos. La red climatológica es la que presenta más elementos fuera de su vida útil y con un residual negativo, lo que implica que en promedio ya está también fuera de dicha vida útil. El siguiente tipo de infraestructura en estado de preocupación son las presas, que de hecho son las que tienen el residual promedio más desfavorable. Sin duda, esta información es de valor dentro de los procesos de evaluación de rehabilitación, renovación o sustitución de la infraestructura, y en el caso específico de las presas, obliga a estudios específicos sobre el riesgo de su falla.

Tabla 4.5. Factores de envejecimiento de la infraestructura en México

Sistema	Población	Vida útil de diseño (años)	Edad promedio (años)	Residual de vida útil (años)	Elementos por encima de su vida útil		Factor de envejecimiento
					Número	Porcentaje	
Red climatológica	7,981	40	54	14	6,450	81	1.34
Red hidrométrica	1,172	40	50	10	748	64	1.27
Presas	208	50	67	17	138	66	1.42
Acueductos	80	40	34	-6	11	14	0.85
P. Potabilizadoras	1,000	40	20	-20	ND	ND	0.54
PTARs*	389	40	19	-21	31	8	0.55

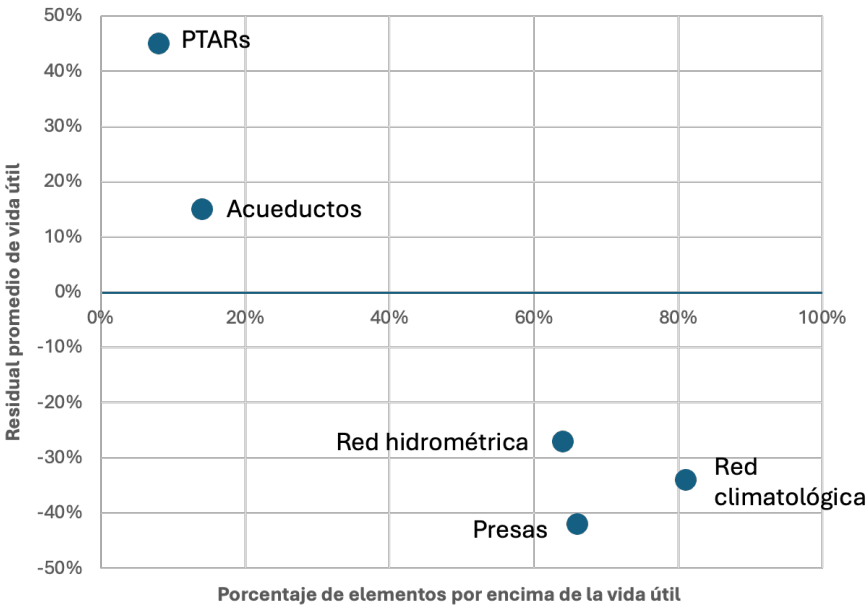
* Con información de OLAS (2025)

Figura 4.23. Factor de envejecimiento medio general de la Infraestructura en México



Fuente: Elaboración propia

Figura 4.24. Envejecimiento de la infraestructura hidráulica (Escala nacional)



Fuente: Elaboración propia

5

Infraestructura Hidráulica en México. Escala Metropolitana (Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara)

Contar con el inventario de la infraestructura hidráulica de las tres principales metrópolis en México desde la óptica de su envejecimiento es un tema de alta relevancia, tanto técnica como económica. En este capítulo se presentan los casos de la Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara. Para cada caso se presenta una breve introducción al espacio físico general, sobre todo pues existen zonas metropolitanas asociadas con cada una de ellas. El análisis se realiza básicamente con información proporcionada por los organismos operadores de los servicios de agua potable y saneamiento, aunque en algunos casos se ha complementado la información con otras fuentes. En cada caso, se aborda el tema de las fuentes de abastecimiento (principalmente las superficiales, como presas), los acueductos principales, las plantas potabilizadoras, la red de distribución de agua potable, la red de alcantarillado sanitario y las plantas de tratamiento. Esta secuencia emula el flujo del agua en el entorno urbano. Se destaca el hecho que, para todos los casos, existe infraestructura que está cerca o ha sobrepasado su vida útil.

5.1 Ciudad de México

5.1.1. Antecedentes

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es, sin duda, el centro de la toma de decisiones tanto políticas como de las relacionadas con la actividad económica, sobre todo del sector terciario. De acuerdo con el gobierno federal, está conformada por 63 unidades político-administrativas: 16 alcaldías de la Ciudad de México, 45 municipios del estado de México y dos de Hidalgo. Las más pobladas son: Iztapalapa, Ecatepec de Morelos, Gustavo A. Madero y Nezahualcóyotl, que sobrepasan el millón de habitantes; con menos de un millón y más de 500 mil habitantes se encuentran Naucalpan de Juárez, Álvaro Obregón, Chimalhuacán, Tlalpan, Tlanepantla de Baz, Coyoacán, Tecámac, Cuautitlán Izcalli, Ixtapaluca, Cuauhtémoc y Atizapán de Zaragoza. Se estima que Huehuetoca, Tizayuca y Nextlalpan serán los tres municipios de mayor crecimiento poblacional, entre los colindantes con la entidad de la Ciudad de México (donde viven 9 millones 204 mil personas). Información de la cámara de diputados indica que la ZMVM se extiende hasta 60 municipios y 16 alcaldías de la CDMX. Con base en las 63 unidades, a 2020, la ZMVM cuenta con una población de 21,436,911 habitantes y cubre una superficie de 6,070.3 km², generando así una densidad de población de 161.3 hab/ha.

Ahora bien, desde el punto de vista del manejo del agua, éste se hace básicamente a nivel municipal, excepto en la propia Ciudad de México (CDMX) en donde la Secretaría de Gestión Integral del Agua (y antes el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, SACMEX) es la responsable de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La CDMX está formada por las alcaldías mencionadas a continuación. En la Zona Poniente: Álvaro Obregón, Benito Juárez, Cuajimalpa de Morelos, Cuauhtémoc y Miguel Hidalgo. En la Zona Norte: Azcapotzalco, Gustavo A. Madero y Venustiano Carranza. En la Zona Oriente: Iztacalco, Iztapalapa y Tláhuac. Finalmente en la Zona Sur: Coyoacán, La Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco (**Figura 5.1** y **Figura 5.2**). Para efectos del presente estudio, el enfoque es en el ámbito de la CDMX, a menos que, por el contenido se tenga que referir a entidades fuera de esta región (como por ejemplo las plantas de tratamiento de aguas residuales).

5.1.2 Fuentes de abastecimiento y acueductos

La construcción de acueductos para el abastecimiento a la población de la Ciudad de México comenzó desde la época precolombina. Se destaca el periodo entre 1446 y 1572. Para 1905 se inicia la captación de agua mediante cárcamos de San Luis Tlaxialtemalco. En 1940 se intensifica la construcción de pozos someros. Entre 1941 y 1952 se incorpora el Sistema Lerma como fuente externa y entre 1982 y 1993 se incorpora también el sistema Cutzamala. A la fecha, las fuentes subterráneas siguen siendo la principal fuente de abastecimiento, aunque la sobreexplotación de las mismas sea una de las causas del hundimiento de la ciudad.

Figura 5.1, Zona metropolitana del Valle de México (Metrópolis de México, 2020)



Fuente: Gobierno de México (2020)

Figura 5.2. Alcaldías de la Ciudad de México



Fuente: lamudi.com.mx

Entre las fuentes subterráneas destacan el propio Acuífero del Valle de México del cual se extrae entre el 55 y el 60% del agua total y el Sistema Chiconautla en el Estado de México y operando desde la década de 1970 para reforzar el abasto en la zona norte de la ciudad. La extracción de agua escaló entre 1940 y 1960 ante el crecimiento explosivo de la ciudad. A 2018, **Escolero et al. (2018)**, relacionan 549 pozos en la zona urbana de CDMX con edades entre 30 y 60 años, 41 pozos en la Bateria Chiconautla con edad mayor a 50 años, 156 pozos en el sistema PAI (edad mayor que 40 años y reposiciones posteriores), 250 pozos en el Sistema Lerma (mayor de 40 años) y un pozo muy profundo relativamente nuevo en la ZMCM.

Asociado con el crecimiento de la demanda y la presión sobre el acuífero, se recurrió a buscar fuentes externas superficiales. Así, el sistema Lerma entró en operación en 1951 (primera etapa) incorporando agua tanto subterránea como superficial del Valle de Toluca. Se estima que éste aporta entre el 6 y el 8% del suministro total. La obra más icónica para la ciudad y quizás también la más crítica es el Sistema Cutzamala, que recoge agua de Michoacán y el Estado de México. En su primera etapa, en 1982, comienza llevando agua desde la Planta Potabilizadora Los Berros. En 1985 se integran más presas y se aumenta el caudal y en 1993-1994 se completa la infraestructura alcanzando una capacidad instalada de 19 m³/s. Su aportación media histórica es de entre el 25 y el 30%, llegando en ocasiones a representar hasta la tercera parte del suministro total. Ante la sequía de los años anteriores redujo su aportación, aunque en 2025, por fortuna las presas se han recuperado.

Adicional a esta gran fuente de abastecimiento, existen otras que representan una fracción muy pequeña como los manantiales de Xochimilco que datan de 1913, los manantiales del Desierto de los Leones y los Dinamos (en la zona poniente) y la presa Madín (en la zona norponiente limítrofe con el Estado de México). El resumen de las fuentes principales y su entrada en operación se muestran en la **Tabla 5.1**. El factor de envejecimiento medio considerando solo los sistemas Lerma y Cutzamala es de 1.17, bajo la consideración de una vida útil de 50 años (para fuentes de abastecimiento).

Tabla 5.1. Principales fuentes de abastecimiento a la CDMX

Subsistema	Tipo	Año de inicio	% de aportación aproximada	Edad (años)
Acuífero Valle de México	Subterránea	1940	60	85
Sistema Lerma	Mixta	1951	7	74
Sistema Cutzamala	Superficial	1982	30	43
Manantiales Xochimilco	Afloramiento/subterránea	1913	2	112
Presa Madín y otros	Superficial	Varios	1	ND

Fuente: Información SIGAGUA, SINA Conagua

Acueductos

De acuerdo con información proporcionada por la Secretaría de Gestión Integral del Agua de la Ciudad de México, el sistema hídrico incluye 732 km de líneas de conducción y acueductos. En la **Tabla 5.2** se muestra la información recopilada de los principales acueductos así como su edad a diciembre de 2025. Para el cálculo del factor de envejecimiento se utilizó una vida útil de diseño de 40 años. La Tabla también consigna a los denominados PAI, correspondientes al Plan de Acción Inmediata.

Con base en la información recopilada, la edad media de los principales acueductos que abastecen a la CDMX se encuentra entre 50 y 56 años (dependiendo la etapa considerada en el sistema Cutzamala y los PAI considerados). El factor de envejecimiento de esta infraestructura oscila entre 1.25 y 1.40. De cualquier manera, las edades y los factores de envejecimiento indican que en su mayoría los acueductos han cumplido ya su vida útil de diseño, por lo cual son claramente un tema obligado de evaluación.

Tabla 5.2. Principales acueductos hacia la Ciudad de México, 2025 (Diciembre)

Acueducto	Inicio de operaciones	Edad (años)	Factor de Envejecimiento*
Sistema Cutzamala	1982, 1985, 1993	43, 40, 32	0.80 a 1.08
Sistema Lerma	1951	74	1.85
Chiconautla	1970	55	1.38
PAI (Varios)	1974 a 1985	51 a 40	1.00 a 1.28

* Edad / Vida útil

Fuente: Información SIGAGUA, SINA Conagua

5.1.3. Plantas Potabilizadoras

La Secretaría de Gestión Integral del Agua (SEGIAGUA) reporta a 2025, 61 plantas potabilizadoras además de 15 plantas cloradoras. La red de esta infraestructura es muy amplia en CDMX, tal y como se consigna en la **Tabla 5.3**, obtenida del Inventario Nacional de Plantas Potabilizadoras y de Tratamiento a diciembre de 2024. Como se puede observar, en la Tabla se consignan las principales 45 plantas potabilizadoras. La capacidad instalada total es de 4,599 l/s y el caudal potabilizado reportado a diciembre de 2024 fue de 3,058 l/s.

Información a 2024 del otrora Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) reporta 61 plantas potabilizadoras, mismas coinciden con muy pequeñas diferencias en el nombre con las del Inventario Nacional .

En esta narrativa es importante destacar el rol de la Planta Potabilizadora Los Berros en el Estado de México, pero que trata el agua proveniente del sistema Cutzamala. Esta planta tiene una capacidad instalada de 20 m³/s. Esta planta inicio operaciones en 1982, junto con

el propio sistema Cutzamala, con una capacidad de 4 m³/s. En 1985 se tuvo una ampliación a 6 m³/a adicionales y en 1993 se tuvo la tercera y última de las etapas que incrementaron el suministro, en esta ocasión a 9 m³/s adicionales.

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2023 (de INEGI, con datos de 2022), indica que para la Ciudad de México de las 63 plantas potabilizadoras, 31 estaban en operación y 32 estaban fuera de operación. Las principales razones de lo anterior son los problemas de diseño, la falta de mantenimiento y que las plantas estaban en proceso de mejora o ampliación.

Desafortunadamente, todas las fuentes consultadas no consignan, dentro de la información, la edad de la infraestructura o el año de construcción o inicio de operaciones. Por este motivo, a la escala metropolitana no fue posible determinar el índice de envejecimiento de las plantas potabilizadoras. Solo se tiene certeza en la edad de la Planta Los Berros, que al tener ya 43 años, ha sobrepasado ligeramente su vida útil. El factor de envejecimiento sería de 1.08.

5.1.4. Redes de distribución de agua potable

Para la red de distribución del agua potable en CDMX, la SEGIAGUA reporta una red primaria de 1,353 km de longitud y una red secundaria de 12,135 km, así como 357 tanques de almacenamiento, con capacidad conjunta de 1.3 Mm³. La cobertura reportada es del 94 por ciento. La **Figura 5.3** consigna la edad de la red por regiones. Se observa una edad que fluctúa entre redes nuevas y más de los 50 años de edad. La simple inspección del mapa indica que una gran parte de la ciudad está cercana o ya supera la vida útil de diseño.

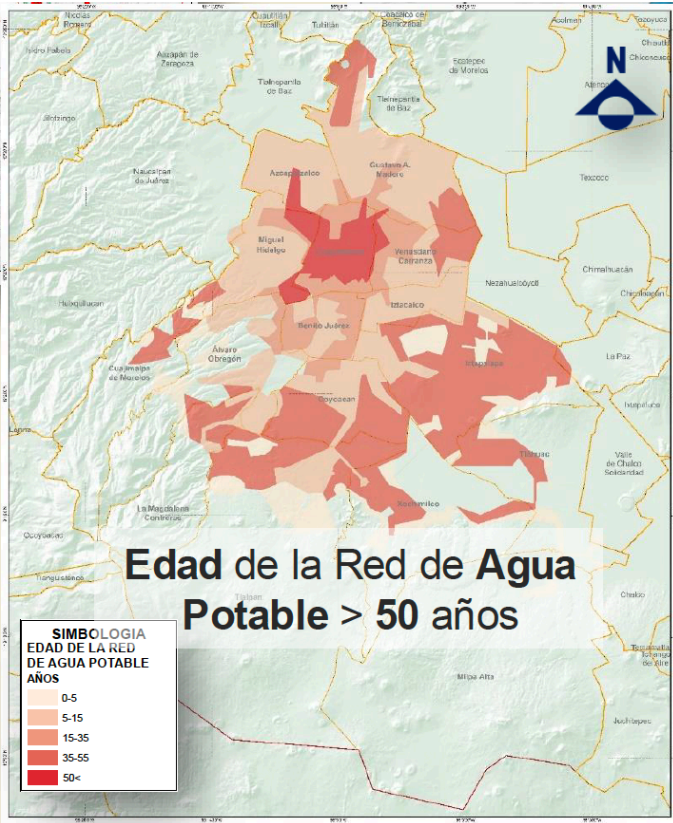
Una aproximación del factor de envejecimiento puede obtenerse mediante un promedio ponderado por superficie. Los valores del porcentaje por edades con respecto del total se muestra en la **Tabla 5.4**. Si se considera una vida útil de la red de 50 años, el factor alcanza un valor medio de 0.52, mismo que no parece de gran preocupación. Sin embargo, una inspección más detallada nos indica que más del 41% de la red está a punto o ya ha superado su vida útil.

Tabla 5.3. Las 45 principales plantas potabilizadoras en Ciudad de México, 2025 (diciembre)

Localidad	Nombre	Capacidad Instalada (l/s)	Localidad	Nombre	Capacidad Instalada (l/s)
Azcapotzalco	Trabajadores del hierro	50	Iztapalapa	Santa Catarina 13	60
	Deportivo Ferrería	50		San Lorenzo Tezonco	6
Gustavo A. Madero	Jardines del Pedregal 5	80		San Lorenzo Tezonco Nuevo	60
	Panamericana	50		Peñón 2	50
	La Libertad	50		Tecomitl 2	60
	Parque Vía Vallejo	40		Auxiliar Xotepingo 4c	50
Iztacalco	Tlacotal	60		Parque Las Antenas	30
	Viga 4	60		Agrícola Oriental	240
	Ciudad Deportiva 2	100	Magdalena Contreras	Río Magdalena	210
Iztapalapa	Carlos L. Gracidas	38		Río Magdalena 2	200
	Cerro de la Estrella 2	60	Tláhuac	Santa Catarina	500
	Granjas San Antonio	60		Santa Catarina 4	60
	Iztapalapa 1	60		Acueducto Tláhuac-La Caldera	40
	Iztapalapa 2	60		Tecomitl 18	50
	La Caldera	700	Venustiano Carranza	Balbuena 2	40
	Purísima 2	60		Peñón de Los Baños	50
	Purísima 3 y 7	135		Santa Anita	40
	Santa Catarina 11	40	Xochimilco	Escudo Nacional	40
	Santa Cruz Meyehualco	120		S-13	40
	Viga 2	40		Cerillos 2	40
	Panteón Civil	180		Cerillos 3	40
	Xaltepec	500		R-11	40
	Santa Catarina 10	60			

Fuente: Conagua (2024e)

Figura 5.3. Edad de la red de distribución de agua potable en CDMX, 2025 (diciembre)



Fuente: SEGIAGUA (2025)

Tabla 5.4. Indicadores de envejecimiento de la red en la CDMX, 2025 (diciembre)

Característica	Edad (años)	Marca de clase	Frecuencia relativa (%)
Mayor que	50	60	5.54
Entre	35 y 55	45	36.25
Entre	15 y 35	25	9.84
Entre	5 y 15	10	36.69
Entre	0 y 5	2.5	11.68

Fuente: SIGAGUA

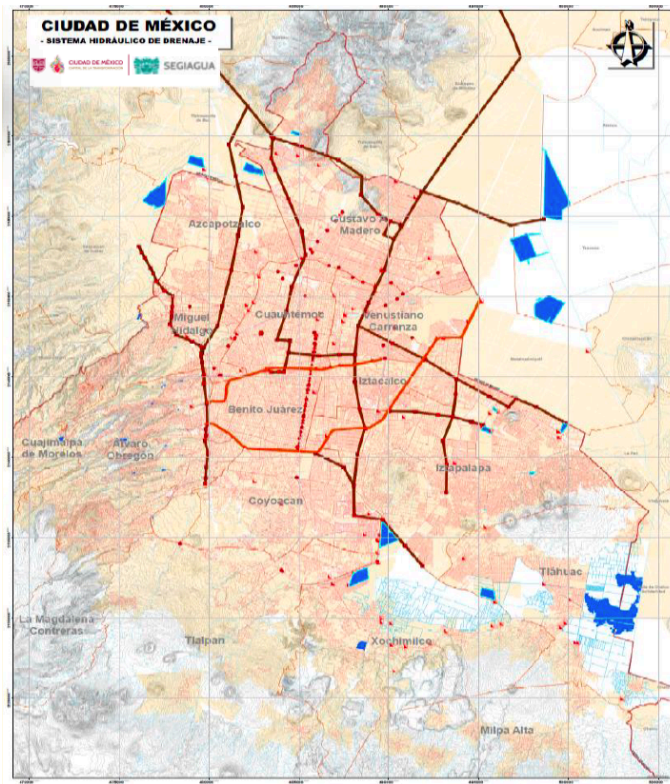
5.1.5. Redes de alcantarillado sanitario

En la CDMX, espacio de jurisdicción de la SEGIAGUA, la Secretaría menciona que la edad de la red de drenaje tiene edades que superan los 70 años. De hecho trabajan sobre el supuesto que las tuberías (o al menos muchas de ellas) han llegado al término de su vida útil. Además del envejecimiento natural de la infraestructura, en CDMX se adicionan factores como zonas de fracturas geológicas (como en Iztapalapa), hundimientos del terreno por sobreexplotación del acuífero (oriente de la CDMX), suelos agresivos (Gustavo A. Madero) y agua con contenidos altos de sales (Iztacalco). Esto ha llevado a que de 2017 a 2025 se hayan atendido más de 700 socavones. La longitud de la red de alcantarillado tiene una extensión de 2,450 km en redes primarias, 11,645 km de redes secundarias y 145 km de colectores marginales, para un total de 14,240 km. Aún así, se reporta una cobertura del 94% en el alcantarillado sanitario.

Cabe mencionar que en las tres metrópolis, como en las demás ciudades del país, el sistema de drenaje funciona en un esquema combinado. Esto quiere decir que existe ingreso de agua pluvial, durante lluvias, al propio alcantarillado. En la mayoría de los casos esto genera problemas pues si la red no fue diseñada para un sistema combinado, el sistema sanitario se satura. El caso de CDMX es aún más particular en ese sentido. Esto por las bajas pendientes y la falta de drenaje natural. Así, en este caso, la infraestructura sanitaria se complementa con 98 plantas de bombeo, 30 sifones, 10 tanques de tormenta, 124 km de cauces y canales a cielo abierto y 52 km de ríos entubados. Hay 19 presas de regulación y 12 lagunas de amortiguamiento. El drenaje profundo se extiende por 177 km con 130 lumbreras de inspección y operación (**Figura 5.4**). La última gran obra para el desalojo, tanto de aguas residuales como pluviales es el Túnel Emisor Oriente que fue construido con un diámetro de 7 metros, una longitud de 62.4 km y una capacidad de 150 m³/s. En cuanto a las edades de la red, se menciona que el 40% de la misma ya tiene más de 50 años (vida útil de diseño). El Centro histórico tiene aún tuberías de barro, mampostería y concreto simple de alrededor de 100 años de edad, aunque el Túnel Emisor Oriente comenzó operaciones apenas en 2019.

En la **Tabla 5.5** se relacionan los grandes colectores que desalojan las aguas servidas, muchas veces en combinación con la pluviales. Considerando una vida útil de diseño de 50 años, el factor de envejecimiento se muestra en la última columna. El promedio asciende a 1.32, lo cual implica que los colectores ya han sobrepasado, en lo general, en 32% su vida útil. Sin embargo, es de notarse que el Emisor Central está ya cumpliendo su vida útil y que el Gran Canal y el Emisor Poniente ya la han superado en forma significativa.

Figura 5.4. Sistema hidráulico de drenaje de CDMX, 2025 (diciembre)



Fuente: SEGIAGUA (2025)

Tabla 5.5. Principales sistemas de desalojo de aguas en CDMX y sus edades a 2025 (diciembre)

Sistema	Año de inicio	Capacidad de diseño (m ³ /s)	Capacidad (2018) (m ³ /s)	Edad (años)	Factor de envejecimiento*
Gran Canal Túnel 1	1900	90	20	125	2.5
Gran Canal Túnel 2	1947	90	20	78	1.56
Emisor del Poniente	1964	90	40	61	1.22
Emisor Central	1975	200	150	50	1
Túnel Emisor Oriente	2008	150	150	17	0.34

* Edad / Vida útil

Fuente: González Reynoso (2018)

5.1.6. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

De acuerdo con información proporcionada por la SEGIAGUA, en la Ciudad de México operan al momento 26 plantas de tratamiento que cuentan con una capacidad instalada conjunta de 5.502 l/s. En la **Tabla 5.6** se muestra la información que fue posible recopilar de los portales oficiales de la Conagua, SINA, de ANEAS y de la información del Observatorio del BID, llamada OLAS. En general, la información disponible incluye por supuesto la identificación y ubicación de las planta así como su capacidad instalada y algún dato del caudal en operación (a distinta fechas). No en todos los casos se dispone de la fecha de construcción o inicio de operación. La **Tabla 5.6** consigna 18 PTARs cuya capacidad instalada conjunta asciende a 5,397 l/s. Esto implica que las restantes ocho plantas, en su conjunto, proporcionan los 105 l/s restantes, es decir son más pequeñas.

Tabla 5.6. Principales plantas de tratamiento en la Ciudad de México, 2025 (diciembre)

No.	Nombre	Delegación	Año de inicio	Edad (años)	Capacidad (l/s)
1	Cerro de la Estrella	Iztapalapa	1972	53	3000
2	San Juan de Aragón	Gustavo A. Madero	1972	53	500
3	Coyoacán	Coyoacán	2006	19	250
4	Chapultepec	Miguel Hidalgo	1956	69	160
5	Ciudad Deportiva	Iztacalco	1972	53	230
6	San Luis Tlaxialtemalco	Xochimilco	1989	36	150
7	El Llano	Tláhuac	2000	25	250
8	Acueducto de Guadalupe	Gustavo A. Madero	1972	53	110
9	Bosques de las Lomas	Miguel Hidalgo	1973	52	25
10	Santa Fé	Álvaro Obregón	2010	15	280
11	San Lorenzo	Tláhuac	1998	27	225
12	San Andrés Mixquic	Tláhuac	1997	28	30
13	San Pedro Atocpan	Milpa Alta	1997	28	60
14	El Rosario	Miguel Hidalgo	ND	-	25
15	Tlatelolco	Cuauhtémoc	ND	-	22
16	Cerro del agua	Coyoacán	ND	-	20
17	H. Colegio Militar	Tlalpan	ND	-	30
18	Reclusorio Sur	Xochimilco	ND	-	30

Fuente: ANEAS (2025), SINA Conagua (2025), OLAS (2025)

Por su magnitud, es importante mencionar a la Planta de Tratamiento Atotonilco, ubicada en el municipio de Atotonilco de Tula en Hidalgo, que si bien está fuera de la CDMX tiene como objetivo tratar las aguas provenientes del Valle de México, conducidas a través del Túnel Emisor Oriente y del Emisor Central. Estos emisores descargan al río El Salto y al canal de riego El Salto-Tlamaco, respectivamente. La planta fue diseñada para un caudal máximo en tiempo de lluvias de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo su caudal medio de $42 \text{ m}^3/\text{s}$ en la época de lluvias y de $35 \text{ m}^3/\text{s}$ en la temporada de estiaje. El agua tratada se entrega a los distritos de riego 003 Tula, 100 Alfayucan y 112 Ajacuba en el Valle del Mezquital. La planta entró en operación en 2017 por lo cual es relativamente nueva y no presenta problema alguno en cuanto a su envejecimiento.

De la información es posible obtener la edad media de las plantas (de las que se cuenta con el dato de edad), mismo que alcanza 39.3 años. También se observa que existen seis PTARs que han sobrepasado la vida útil de 40 años. La capacidad conjunta de esas plantas asciende a 4025 l/s , es decir el 73% de la capacidad total instalada. Al calcular el indicador de envejecimiento de estas infraestructuras, se tiene un valor medio de 0.98. Es decir, en general, las PTARs de la Ciudad de México están por cumplir su vida útil. El indicador promedio de las seis plantas que han sobrepasado su vida útil es de 1.39 por lo cual la edad de esas plantas está un 39% por encima su vida útil. Esto sugiere que la infraestructura de tratamiento de la Ciudad de México requiere de una atención prioritaria. Por supuesto las acciones de mantenimiento o la falta de ellas modifican en gran medida el riesgo de falla en las plantas, principalmente en lo que respecta al equipamiento urbano.

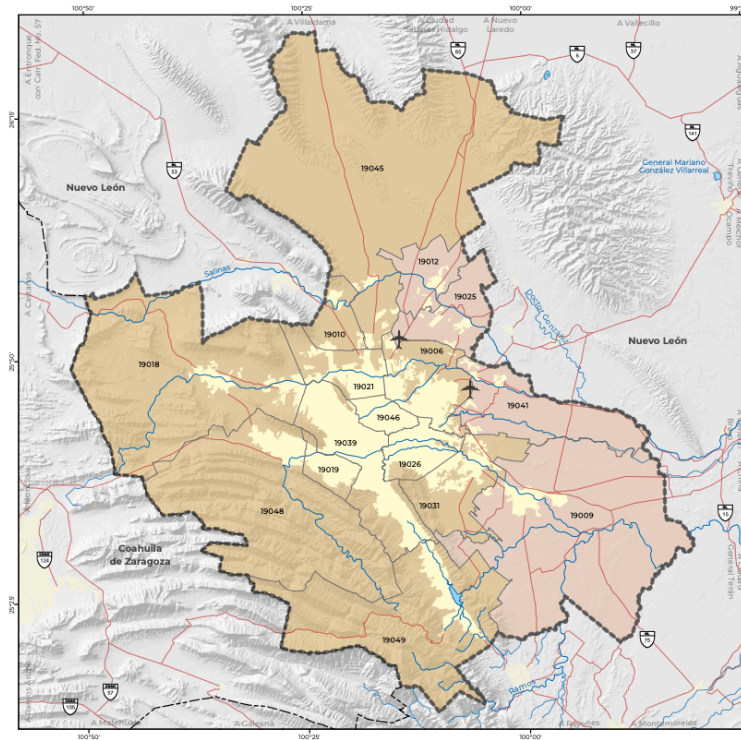
5.2 Monterrey

5.2.1. Antecedentes

La zona conurbada de Monterrey, usualmente referida como el Área Metropolitana de Monterrey (AMM), de acuerdo con INEGI incluye 13 municipios; es la segunda más poblada de México después del Valle de México, superando los 5.3 millones de habitantes según datos del Censo 2020. El AMM es un importante polo económico y demográfico del país. Los municipios que la componen son: Apodaca, Cadereyta Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, General Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago (**Figura 5.5**).

Hay otros municipios que, si bien no tiene una conurbación física con el AMM, INEGI considera que presentan una integración funcional. Estos son Ciénega de Flores, General Zuazua y Pesquería, mismos que para ciertos análisis son considerados como parte del área metropolitana. Para el caso de la gestión del agua en el entorno urbano, el organismo operador, denominado Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, considera a los 16 municipios mencionados como los “metropolitanos”. Así, la superficie total del AMM asciende a 7,440 km² siendo Salinas Victoria el municipio más grande, con 1667.4 km², y San Nicolás de los Garza el más pequeño con apenas 60.1 km². Con datos de 2020, la densidad urbana es de 106.8 hab/ha, aunque alcanza en un municipio los 148 hab/ha.

Figura 5.5. Área Metropolitana de Monterrey (Metrópolis de México, 2020)



Fuente: Gobierno de México (2020)

5.2.2. Fuentes de abastecimiento, presas y acueductos

El Área Metropolitana de Monterrey se abastece tanto de aguas superficiales, que representan entre el 60 y 65% del suministro, como de aguas subterráneas, que contribuyen entre el 35 y 40%. Con respecto al agua subterránea, ésta proviene, por orden de magnitud en volumen, de los sistemas acuíferos Buenos Aires (Huasteca), Cañón del Huajuco (Santiago), Área Metropolitana de Monterrey y Mina. Se tiene un sistema con no menos de 240 pozos. Los sistemas acuíferos son también, fuente de abastecimiento para la industria, la que tienen y opera sus propios pozos. El análisis de la edad y condiciones de esa infraestructura es motivo de un estudio específico que no se incluye en este reporte.

Presas

En cuanto al abastecimiento superficial, el agua proviene al momento de tres fuentes: La presa Rodrigo Gómez, conocida también como La Boca, en operación desde 1964 y con capacidad útil de 35 Mm³; la presa José López Portillo o Cerro Prieto, construida en 1984, con capacidad de 300 Mm³, y la Presa El Cuchillo, en operación desde fines de 1993, con capacidad de 1123 Mm³. En 2019 comenzó la construcción de la Presa Libertad, hoy nombrada por el Gobierno del Estado como Presa León. Esta presa, con una capacidad de 220 Mm³, no ha sido oficialmente declarado como terminada, y no se encuentra aportando al sistema hídrico de Monterrey.

La información resumida sobre la edad de las presas se muestra en la **Tabla 5.7**, así como su factor de envejecimiento, calculado para la consideración de una vida útil de 50 años. La edad promedio de esta infraestructura es de 44.7 años y el factor de envejecimiento medio es de 0.89. Estos valores sugieren que si bien no es un tema alarmante, las obras están acercándose al fin de su vida útil. En el caso de La Boca, ésta se encuentra ya por encima de ella y Cerro Prieto está ya cercana. Esto debería tomarse en cuenta para la programación y ejecución de acciones de mantenimiento preventivo y por supuesto correctivo, a fin de reducir potenciales riesgos asociados con el malfuncionamiento o la falla de la infraestructura.

Tabla 5.7. Presas que abastecen al AMM, 2025 (diciembre)

Presa	Año de construcción	Edad (años)	Factor de envejecimiento*
La Boca	1964	61	1.22
Cerro Prieto	1984	41	0.82
El Cuchillo	1993	32	0.64
Libertad (León)	En proceso	0	ND

* Edad / Vida útil

Fuente: Sistema de Seguridad de Presas Conagua y SADM

Acueductos

Para conducir el agua desde las fuentes de abastecimiento, ya sea pozos en sistemas acuíferos, pero sobre todo desde las presas, la ciudad cuenta con varios acueductos. El acueducto Linares – Monterrey es el más largo, con 133 kilómetros de longitud. Los dos acueductos de la Presa El Cuchillo tienen 91 km cada uno. La información sobre el inicio de operaciones, edad y factor de envejecimiento, calculado sobre la base de una vida útil de diseño de 40 años, se presenta en la **Tabla 5.8**.

Tabla 5.8. Acueductos para el abastecimiento de agua al AMM, 2025 (diciembre).

Acueducto	Inicio de operaciones	Edad (años)	Factor de envejecimiento*
La Boca	1963	62	1.24
La Huasteca	1954	71	1.42
Mina I y Galerías	1956	69	1.38
San Francisco	1956	69	1.38
Mina II	1976	49	0.98
Monterrey II	1976	49	0.98
Anillo de transferencia I	1984	41	0.82
Linares – Monterrey	1984	41	0.82
Cuchillo I	1994	31	0.62
San Pedro	1975	50	1
Monterrey V, 1ª Etapa	2011	14	0.28
Cuchillo II	2024	1	0.02

*Edad / Vida útil

Fuente: SADM (2025)

Como se observa en la tabla, cuatro acueductos han superado ya su vida útil. En promedio, la edad de toda esta infraestructura es de 45.6 años y su factor de envejecimiento de 0.91, muy cercano a su término de vida útil. Es de notar el nuevo acueducto desde la presa El Cuchillo, que entró en operación hace un poco más de un año. También es de notar que cuatro de los acueductos han sobrepasado ya su vida útil. Es de mencionar, el caso de las líneas Linares – Monterrey y Cuchillo I, que sin haber alcanzado su vida útil han presentado

ya episodios de falla importantes, mismas que sugieren posibles deficiencias en el mantenimiento o la operación. Esto lo dejó en claro la crisis del agua de 2022.

5.2.3. Plantas Potabilizadoras

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales (del INEGI), ya referido, en los 13 municipios metropolitanos del AMM existen 13 plantas potabilizadoras, mismas que están todas en operación. Destacan por su importancia y capacidad la planta San Roque (12,000 l/s) y la planta La Boca (2,400 l/s). A diciembre de 2024, el reporte del Inventario Nacional emitido por Conagua solamente consigna a las principales, siendo éstas las mostradas en la **Tabla 5.9**. Actualmente, las plantas de San Roque y La Boca son las que potabilizan el agua que se suministra a la zona metropolitana principal. La capacidad instalada es de 14,400 l/s.

Por lo que respecta a la edad de la infraestructura de potabilización en Monterrey se tiene que la Planta San Roque fue construida en 1984 como parte del proyecto que incluyó a la Presa Cerro Prieto. Aunque comenzó tratando solamente el agua proveniente de esa presa y como opción, el agua de la presa La Boca (mediante la interconexión de los acueductos), desde 1994 recibe y potabiliza también el agua proveniente de la Presa El Cuchillo. La planta cuenta actualmente con 41 años de edad y continua potabilizando alrededor del 60% del agua suministrada al AMM. Por su parte, la Planta Potabilizadora La Boca inició operaciones en 1963, simultáneamente con la inauguración de la Presa La Boca (oficialmente llamada Presa Rodrigo Gómez). La edad de esta infraestructura alcanzó ya los 62 años.

Utilizando el indicador de envejecimiento en estas dos plantas, se encuentra que tiene un valor de 1.29. Es decir en promedio la infraestructura de potabilización ya se encuentra operando un 29% por encima de su vida útil. El indicador individual para la planta La Boca es de 1.55. A la luz de esta información, las plantas potabilizadoras en Monterrey muestran ya una edad avanzada, más allá de su vida útil de diseño. Por esta razón, sería conveniente realizar trabajos detallados de mantenimiento pero sobre todo de evaluación, especialmente en aquellos procesos o sistemas que no han sido actualizados o ampliados. Esto a fin de que en el AMM se pueda seguir contando con el suministro requerido para la realización de las actividades económicas y poblacionales..

5.2.4. Red de distribución de agua potable

En relación con la red de distribución de agua potable en el AMM, el anuario estadístico público, con datos a 2022 indica como indicadores principales los siguientes: 1,507,339 tomas totales registradas, una longitud de red de distribución de 12,386 km y una cobertura de agua potable de 99.7%. El Organismo Operador proveyó información sobre la edad de la red con base en la **Figura 5.6**. La **Tabla 5.10** muestra los indicadores de edad y el cálculo del factor de envejecimiento con base en una vida útil de diseño de 50 años.

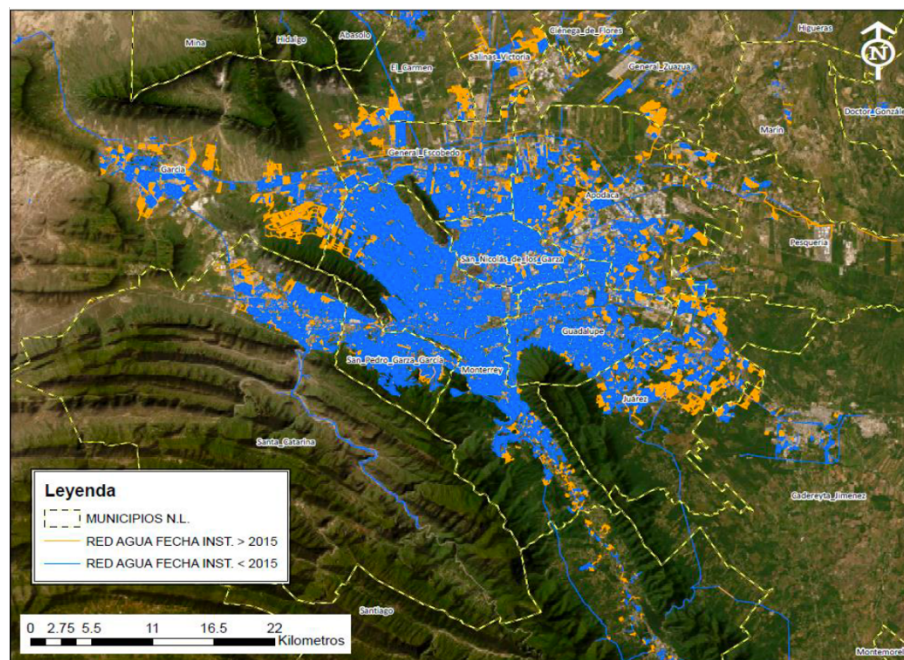
Tabla 5.9. Principales plantas potabilizadoras en el AMM, 2025 (diciembre)

Municipio	Localidad	Nombre	Capacidad (l/s)
Cadereyta de Jiménez	Cadereyta	Cadereyta	300
Ciénega de Flores	Ciénega de Flores	Ac. Cerritos No. 1	50
Juárez	San Roque	San Roque	12,000
Monterrey	Monterrey	La Boca	2,400

Fuente: Coangua (2025) y SADM (2025)

Con información de la **Tabla 5.10** la edad media ponderada de la red es de 36.1 años y el factor de envejecimiento, también ponderado asciende a 0.72. Esto indica que en general, en el AMM la red se encuentra por debajo de su vida útil. Sin embargo, es importante también mencionar que el 22.2% (un poco más de la quinta parte de la red) presenta edades mayores que su vida útil. Esto evidencia la necesidad de fortalecer los programadas de mantenimiento, rehabilitación o sustitución de tramos de tubería. Este tema trasciende los alcances de esta investigación, pero sin duda debería tener la más alta relevancia del Organismo Operador.

Figura 5.6. Red de distribución de agua potable en el AMM, 2025 (diciembre)



Fuente: SADM (2025)

Tabla 5.10. Indicadores de envejecimiento de la red en el AMM, 2025 (diciembre)

Característica	Edad (años)	Marca de clase	Frecuencia relativa (%)
Mayor que	70	75	6.54
Entre	45 y 70	58	15.67
Entre	35 y 45	40	20.61
Entre	25 y 35	30	30.80
Entre	15 y 25	20	20.13
Entre	5 y 15	10	6.25

Fuente: SADM (2025)

5.2.5. Red de alcantarillado sanitario

Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey reporta una cobertura de alcantarillado sanitario del 98.1% a 2022. La longitud de la red es del orden de 11,800 km con diámetro que van desde 20 cm en las atarjeas de las redes locales hasta 2.44m en los colectores que lleva el agua residual a las Plantas de Tratamiento, como Dulces Nombres. En la **Tabla 5.11** se muestran los indicadores de la red con información provista por el Organismo Operador. Con la información recopilada se obtiene un promedio ponderado de edad media de 33.4 años en el AMM. Si se considera una vida útil de 50 años, usual para tuberías de PVC, el factor de envejecimiento medio ponderado en el área metropolitana es de 0.67, aún por debajo de su vida útil de diseño. Sin embargo no se debe olvidar que casi el 20% (una quinta parte) de la red presenta edades que sobrepasan dicha vida útil. En comentarios directos de personal clave del Organismo Operador menciona que en la zona centro de Monterrey y San Nicolás las edades superan los 60 años. Si bien la red en general es más joven que la de CDMX los problemas de roturas especialmente en las zonas más antiguas de la ciudad se han traducido en socavones que atentan contra la dinámica de la ciudad y también contra el bienestar de las personas.

5.2.6. Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales

Como se mencionó anteriormente, la prestación de servicios de agua y saneamiento de Monterrey. A través de un convenio, una entidad paraestatal es la responsable del servicio en todo el estado de Nuevo León. Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey (SADM) trabaja con municipios metropolitanos y no metropolitanos. La historia del tratamiento de aguas en Monterrey comienza en 1905 con la instalación del primer tanque Imhoff y ha continuado, sobre todo siguiendo el crecimiento de la mancha urbana. En la **Tabla 5.12** se muestra el listado de las PTARs que se ubican en el grupo de los primeros. En cursiva se resaltan las plantas de mayor importancia para el propio organismo. Sin embargo, todas las plantas listadas corresponden a municipios metropolitanos. Destacan por su capacidad las plantas

Dulces Nombres, Noreste y Norte. Entre las tres se alcanza una capacidad instalada de 13,375 l/s. Estos con los 200 l/s de Santa Rosa, son los 13,575 l/s que reporta SADM en su portal.

Tabla 5.11. Indicadores de la red de alcantarillado sanitario en el AMM, 2025 (diciembre)

Característica	Edad (años)	Marca de clase	Frecuencia relativa (%)
Mayor que	65	70	6.11
Entre	45 y 65	55	13.70
Entre	35 y 45	40	15.12
Entre	25 y 35	30	33.36
Entre	15 y 25	20	23.75
Entre	5 y 15	10	7.95

Fuente: SADM (2025)

La información recopilada de las plantas en el AMM metropolitana indica un promedio de edad de 27.2 años, aun por debajo de su vida útil. Sin embargo, las plantas Santa Rosa (metropolitana) y El Carmen (no metropolitana) ya se encuentra más allá de su vida útil.

El factor de envejecimiento medio en el AMM metropolitana es de 0.68, lo cual indica que en promedio a las plantas aún les queda un 32% de vida útil. Las tres plantas más grandes, sin embargo, tienen un factor de envejecimiento del orden de 0.75, por lo cual ya deberían estar siendo consideradas para su intervención, o al menos siendo susceptible a inversiones para su mantenimiento mayor. Los casos de las plantas Norte, Noreste y Dulces Nombres podrían estar sujetos a un análisis más detallado pues todas ellas han sido sujeta a ampliación de su capacidad.

Tabla 5.12. Plantas de tratamiento en los municipios metropolitanos operadas por SADM, 2025 (diciembre)

No.	Nombre	Municipio	Año de inicio	Edad (años)	Capacidad (l/s)
1	García	García	ND	-	175
2	El Carmen	El Carmen	1979	46	20
3	Salinas Victoria	Salinas Victoria	2016	9	40
4	San Miguel Interpuerto	Salinas Victoria	2015	10	50
5	Unión San Javier	Salinas Victoria	ND	-	5
6	Ciénega de Flores	Ciénega de Flores	ND	-	25
7	Pesquería	Pesquería	2000	25	25
8	General Zuazua	General Zuazua	2013	12	350
9	<i>Santa Rosa</i>	Apodaca	1979	46	200
10	<i>Dulces Nombres</i>	Pesquería	1996	29	7500
11	<i>Noreste</i>	Apodaca	1995	30	1875
12	<i>Norte</i>	General Escobedo	1995	30	4000
13	Cadereyta I	Cadereyta	1994	31	250
14	Cadereyta II	Cadereyta	ND	-	140
15	Santiago	Santiago	1994	31	200

Fuente: ANEAS, SINA y SADM (2025)

5.3 Guadalajara

5.3.1. Antecedentes

El Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) es la tercera más grande de México. De acuerdo con INEGI, está conformada por nueve municipios clave y, a 2020, cuenta con 5.2 millones de habitantes. El INEGI la clasifica como una zona metropolitana fundamental para Jalisco, mostrando su expansión urbana y demográfica que la consolida como un gran centro poblacional y económico, conectando a sus municipios por procesos de conurbación. Los municipios que la conforman, según el IMEPLAN son: El Salto, Guadalajara, Ixtlahuacán de los Membrillos, Juanacatlán, San Pedro Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga, Tonalá, Zapopan y Zapotlanejo (**Figura 5.7**)

De acuerdo con información del gobierno de Jalisco, disponible en <https://jalisco.gob.mx/jalisco/guadalajara>, el AMG incluye también al municipio de Acatlán de Juárez, por lo que serían diez los municipios considerados. La superficie cubierta por los diez municipios es de 2,551.34 km² (según el gobierno de Jalisco) generando una densidad media de 21.45 hab/ha. INEGI, sin embargo, reporta una extensión de 3,265.46 km². En adelante, este reporte se enfoca principalmente a la ciudad de Guadalajara y a la infraestructura que administra el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado (SIAPA). El AMG es un importante centro cultural y demográfico de Jalisco, resultado de la expansión urbana más allá de los límites originales de la ciudad de Guadalajara.

Figura 5.7. Mapa del Área Metropolitana de Guadalajara



Fuente: IMEPLAN (2025)

5.3.2. Fuentes de abastecimiento, presas y acueductos

Fuentes y presas

El abastecimiento de agua potable al AMG se realiza tanto de fuentes superficiales como subterráneas. Entre las primeras figuran en forma relevante el sistema de presas El Zapotillo, El Salto, La Red y Calderón, con acueductos de longitud cercana a los 100 km, Por otro lado, otra fuente superficial muy importante es el Lago de Chapala, desde donde se encuentra el acueducto del llamado Sistema Antiguo, que pasa por la Presa Poncitlán, Presa Las Pintas y Presa La Calera; y el Acueducto Cerrado, desde la Planta de Bombeo Chapala. Además, se realizan extracciones de los sistemas Toluquilla, Tesistán y Manantiales y Colomos. En la **Tabla 5.13** se consignan todas las presas que están involucradas en el sistema.

Tabla 5.13. Presas del sistema de abastecimiento al AMG, 2025 (diciembre)

Presa	Año de construcción	Edad (años)	Factor de envejecimiento*
El Zapotillo	2011 a 2024	14	0.28
El Salto	1994	31	0.62
La Red	1968	57	1.14
Calderón	1991	34	0.68
Lago de Chapala	ND	ND	ND

*Edad / Vida útil

Fuente: SIAPA (2025)

La edad promedio de esta infraestructura es de 34 años, aunque la única que sobrepasa su vida útil es La Red, que es una presa relativamente pequeña, con un volumen útil máximo de 14 hm³. Si bien en estricto sentido el Lago de Chapala puede operarse como una presa, al ser un cuerpo natural no se ha incluido en los cálculos. El factor medio de envejecimiento es de 0.68, lo cual parece indicar que este tema no alcanza a ser crítico. Un análisis mucho más detallado se requiere en el caso de El Zapotillo, pues la modificación de los niveles de operación y sobre todo la intervención en la cortina al incluir unas ventanas que no fueron concebidas en el diseño original, pueden haber impactado en la integridad de la estructura. Esto, aunado a los años en la obra estuvo suspendida pueden ser factores de riesgo adicionales. El sistema de pozos, que asciende a 213 presenta edades oscilan entre 1 y 72 años. El análisis de esa información no está en el alcance de esta investigación, aunque se reconoce que podría representar un factor de riesgo para el organismo operador.

Acueductos

En lo correspondiente a acueductos, los más relevantes son el Acueductos Presas El Salto – Calderón, el Acueduto Sistema Antiguo Chapala (67 km) y el Acueducto Cerrado Chapala – Guadalajara (42 km). La información de edades y factores de envejecimiento se consigna en la **Tabla 5.14**. La información indica que la edad promedio de la infraestructura es de 41 años, aunque solo un acueducto tiene una edad por encima de la vida útil, definida aquí como 40 años. El factor de envejecimiento medio es de 1.025. El sistema antiguo de Chapala es notorio por tener una edad que ya supera en 73% su vida útil de diseño.

Tabla 5.14. Principales acueductos hacia el AMG, 2025 (diciembre)

Acueducto	Año de construcción	Edad (años)	Factor de envejecimiento*
Sistema Antiguo	1954-1956	69	1.725
Chapala - Guadalajara	1991	34	0.85
Zapotillo	1991	34	0.85
El Salto – La Red	1991	34	0.85
Presa Calderón	1991	34	0.85

*Edad / Vida útil

Fuente: SIAPA (2025)

5.3.3. Plantas Potabilizadoras

En Guadalajara el SIAPA opera cinco plantas de tratamiento que en conjunto tienen una capacidad instalada de 15,700 l/s. Están identificadas con número consecutivo I a V, aunque también se utiliza su nombre de acuerdo con su ubicación. Destaca por su importancia la Planta Potabilizadora I (Miravalle) con 9,000 l/s de capacidad instalada. La Tabla 5.x muestra la información extraída del Inventario Nacional de Conagua. Como se observa hay plantas ubicadas en otros municipios de la conurbación, tales como Tlaquepaque, Tlajomulco de Zúñiga y Tonalá, pero que aportan al AMG. La información referente a su construcción o inicio de operación se muestra en la **Tabla 5.15**. La primera de estas infraestructuras fue construida en 1956 mientras la última es muy reciente, construida en 2023, entrando en operación en 2024.

Tabla 5.15. Plantas potabilizadoras en Guadalajara, operadas por el SIAPA, 2025 (diciembre)

Municipio	Localidad	Nombre	Capacidad (l/s)
Guadalajara	Guadalajara	Guadalajara PP I (Miravalle)	9,000
Tlaquepaque	Tlaquepaque	Guadalajara PP II (Las Huertas)	2,000
Tonalá	Tonalá	Guadalajara PP III (San Gaspar)	3,000
Guadalajara	Guadalajara	Guadalajara PP IV (Toluquilla)	1,200
Tlajomulco de Zúñiga	Tlajomulco de Zúñiga	Guadalajara PP V (Los Agaves)	300

Fuente: Conagua (2025) y SIAPA (2025)

Como se puede observar en la **Tabla 5.16**, la edad promedio de las Plantas Potabilizadoras en Guadalajara es de 31.2 años, generando un factor de envejecimiento medio de 0.78. Por supuesto que estos valores están altamente influenciados por la planta nueva Los Agaves. Sin ella, la edad media sube a 38.8 años y el factor a 0.97, manifestando claramente una condición casi crítica. Aun así, la única obra que sobrepasa su vida útil es la Planta Miravalle. La infraestructura de potabilización no parece ser un tema crítico para el SIAPA, aunque la planta más grande ya debería ser objeto de estudios detallados dada su edad. Las Plantas II y III están por arriba del 75% de su vida útil, por lo que los programas de mantenimiento deberán ser aplicados en tiempo y forma.

Tabla 5.16. Edad de las Plantas potabilizadoras en Guadalajara operadas por el SIAPA, 2025 (diciembre)

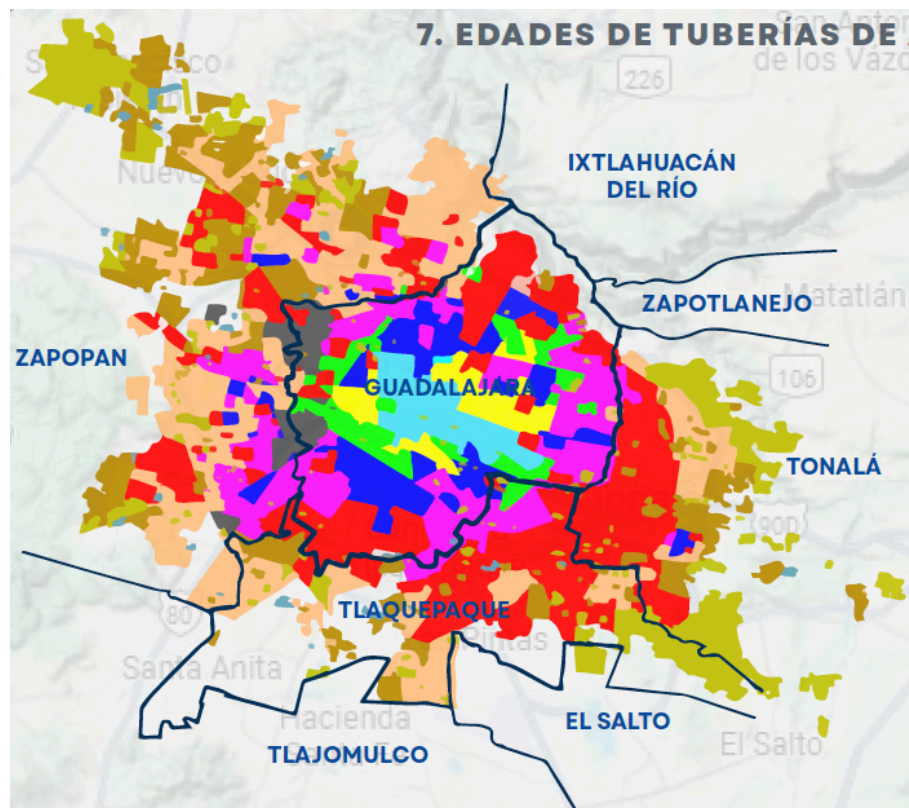
Planta	Nombre	Construcción	Edad (años)
I	Miravalle	1956	69
II	Las Huertas	1991	34
III	San Gaspar	1992	33
IV	Toluquilla	2006	19
V	Los Agaves	2024	1
		Promedio	26.8

Fuente: SIAPA (2025)

5.3.4. Red de distribución de agua potable

En el AMG, el SIAPA reporta una red de distribución con una longitud de 8,601 km con 200 tanques de almacenamiento y regularización. Las edades de la red se muestran tanto en la **Figura 5.8** como en la **Tabla 5.17**. Las edades de los tanques oscilan entre 1 y 49 años. De la información se obtiene que la edad media ponderada de la red en el AMG es de 41 años. El factor de envejecimiento asciende a 1.01. Esto indica que, en promedio general, la red de agua potable en el AMG está justo llegando a su vida útil. Sin embargo, se observa también que al menos el 23% (casi un cuarto de la red) se encuentra ya por encima de la vida útil de 50 años. Esto, junto con la distribución espacial de la edades de tuberías debería orientar las inversiones en evaluación, mantenimiento, rehabilitación y sustitución.

Figura 5.8. Distribución espacial de edades de la red de distribución de agua potable en el AMG, 2025 (diciembre)



Fuente: SIAPA (2025)

Tabla 5.17. Indicadores de la red de distribución de agua potable en el AMG, 2025 (diciembre)

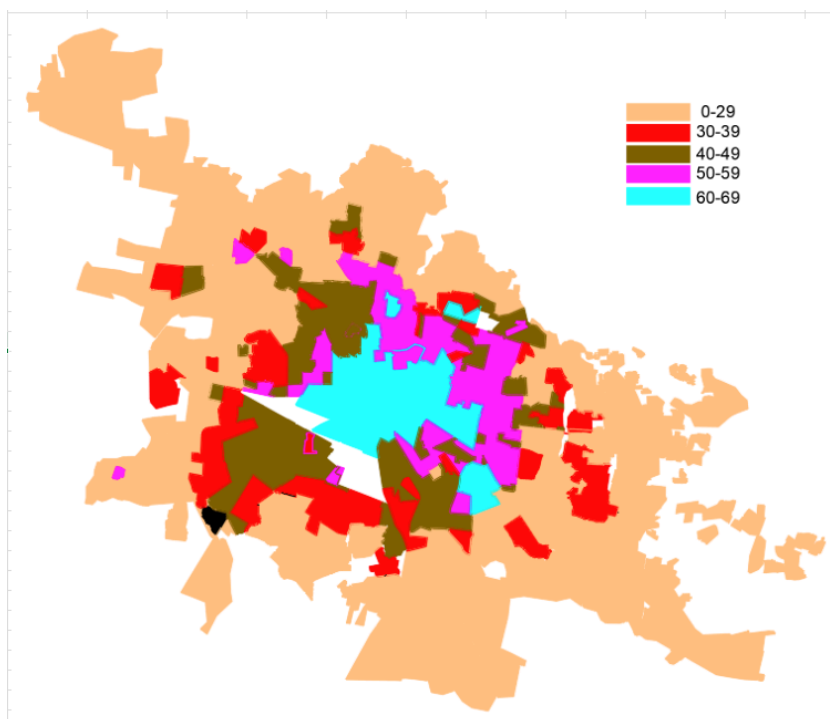
Característica	Edad 1 (años)	Edad 2 (años)	Longitud (km)	Frecuencia relativa (%)
Entre	0	2	90.38	1.05
Entre	3	12	557.24	6.48
Entre	13	22	496.84	5.78
Entre	23	32	1736.91	20.19
Entre	33	42	2264.48	26.33
Entre	43	52	1484.17	17.26
Entre	53	62	794.77	9.24
Entre	63	72	443.17	5.15
Entre	72	82	299.3	3.48
Entre	83	92	433.99	5.05

Fuente: SIAPA (2025)

5.3.5. Red de alcantarillado sanitario

En el AMG, el SIAPA opera una red de alcantarillado sanitario de 8,669 km con edades que fluctúan en entre los cero y los 69 años. De esta longitud total 7,841 km corresponden a líneas secundarias (el 90.4%) y 828 km a colectores (9.6%). La zona del centro de la ciudad es en donde se observan los tramos de mayor antigüedad, como se puede observar en la **Figura 5.9**. Esta infraestructura se complementa con 11 cárcamos de aguas negras y 26 de aguas pluviales cuyas edades oscilan entre los 15 y 35 años de edad. Asimismo, en la **Tabla 5.18** se muestra el resumen de las edades de las tuberías secundarias y su porcentaje con respecto al total.

Figura 5.9. Distribución de la red de alcantarillado edades en el AMG, 2025 (diciembre)



Fuente: SIAPA (2025)

Tabla 5.18. Indicadores de edad de la red secundaria de alcantarillado en el AMG. 2025 (diciembre)

Característica	Edad 1 (años)	Edad 2 (años)	Longitud (km)	Frecuencia relativa (%)
Entre	0	25	4159	53.04
Entre	26	35	987	12.59
Entre	36	45	1049	13.38
Entre	46	55	878	11.20
Entre	56	65	768	9.79

Fuente: SIAPA (2025)

A partir de la información se puede determinar que el promedio ponderado de edad de la red de alcantarillado es de 27.5 años y que el factor de envejecimiento medio, considerando una vida útil de 50 años, es de 0.77, es decir aún un 23% por debajo de su vida útil. Sin

embargo, se observa también que cerca de un 21% de la red se encuentra o ya ha sobrepasado su vida útil.

5.3.6. Plantas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo con información proporcionada por SIAPA, el organismo operador de Guadalajara, las plantas de tratamiento que operan son ocho, mismas que tiene una capacidad instalada conjunta de 11.02 m³/s, aunque el último dato sobre el caudal de operación asciende solamente a 6,268 l/s (**Tabla 5.19**). Destacan por su importancia la PTAR Agua Prieta, con una capacidad instalada de 8500 l/s y que actualmente opera a más de 50% de su capacidad, y la PTAR El Ahogado con una capacidad de 2250 l/s. En los registros se tiene al menos dos PTARs adicionales en la ciudad: Zoológico de Guadalajara (20 l/s) y Country Club (50 l/s). Sin embargo, con base en la información del SIAPA, todo parece indicar que estas plantas están ya fuera de operación, o simplemente que no son operadas por el organismo.

Tabla 5.19. Plantas de tratamiento en la ciudad de Guadalajara, 2025 (diciembre)

No.	Nombre	Municipio	Año de inicio	Edad (años)	Capacidad (l/s)
1	El Ahogado	Tlajomulco de Zúñiga	2012	13	2250
2	Agua Prieta	Zapopan	2014	11	8500
3	Río Blanco	Zapopan	2001	24	150
4	Virreyes	Zapopan	1997	28	20
5	Tonalá Norte	Tonalá	1997	28	10
6	El Vado Sur	Zapotlanejo	2018	7	52
7	Misión del Acueducto	Tonalá	2005	20	22
8	Loma Real	Zapopan	2022	3	20.5

Fuente: SIAPA (2025)

En lo concerniente al envejecimiento de la infraestructura, se observa que la PTAR más antigua dada de 1997. La edad promedio de las plantas es de 16.8 años, aún muy inferior a la vida útil de este tipo de obras, misma que se ha considerado como 40 años. Al calcular el indicador de envejecimiento, se obtiene en promedio un valor de 0.42. Esto quiere decir que, en general, en Guadalajara aún falta un 52% en la vida útil de las plantas. Asumiendo

que se ha llevado a cabo los mantenimientos adecuados, no se observa un riesgo asociado con el envejecimiento de las plantas de tratamiento.

5.4 Las tres metrópolis en contexto

A manera de resumen se muestran tanto la **Tabla 5.20** como la **Figura 5.10**. Los factores de envejecimiento medios por metrópolis sugieren un mayor problema en CDMX seguido del Área Metropolitana de Monterrey y posteriormente de Guadalajara. Aunque al realizar la comparación por subsistema se pueden apreciar dinámicas distintas. Por ejemplo, para el caso de Acueductos y redes, el AMG presenta mayor envejecimiento en la infraestructura.

La **Figura 5.11** presenta en forma gráfica el valor medio del factor de envejecimiento de las tres metrópolis en función de tipo de obra. Resalta el hecho de que, en promedio, los acueductos y las plantas potabilizadoras han superado ya su vida útil mientras las presas están cerca de hacerlo. Las plantas de tratamiento y la red de alcantarillado son los elementos que presentan los menores factores de envejecimiento. Estos últimos están seguramente sesgados por el hecho de que el crecimiento demográfico obliga a la expansión de las redes de servicios, tales como las redes de agua potable y alcantarillado, así como las plantas de tratamiento. Esto no exime a las ciudades de contar con redes muy antiguas, especialmente en los centros históricos de las mismas.

Tabla 5.20. Valores numéricos de los factores de envejecimiento de las tres metrópolis, 2025 (diciembre)

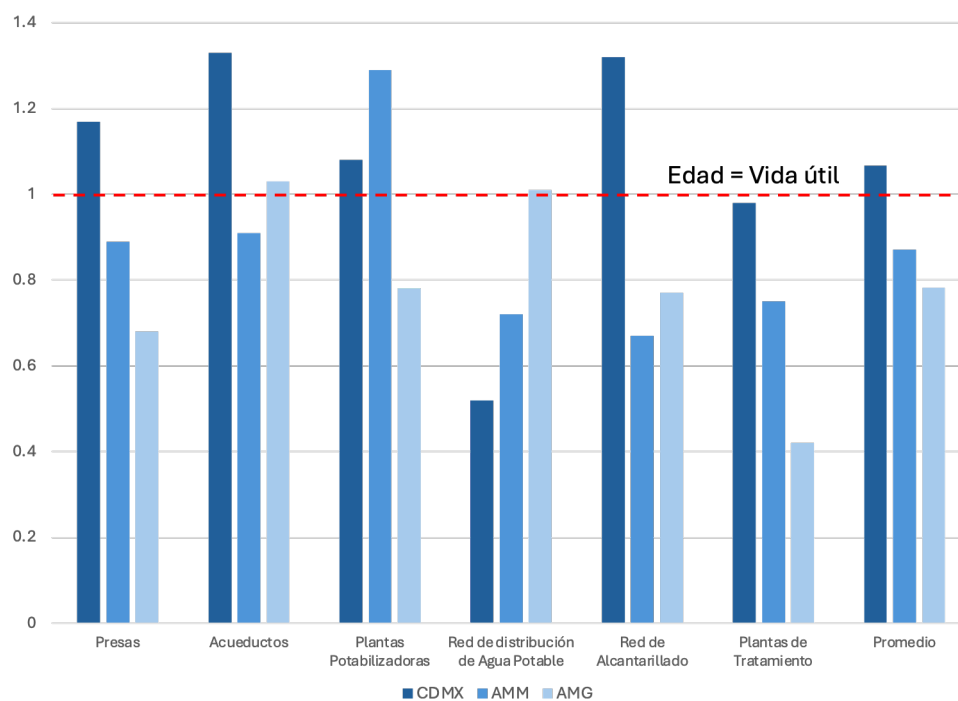
Metrópolis	Presas	Acueductos	Plantas Potabilizadoras	Red de distribución de Agua Potable	Red de Alcantarillado	Plantas de Tratamiento	Promedio
CDMX	1.17	1.33	1.08	0.52	1.32**	0.98	1.14
AMM	0.89	0.91	1.29	0.72	0.67	0.75	0.87
AMG	0.68	1.03	0.78	1.01	0.77	0.42	0.78
Promedio	0.91	1.09	1.05	0.75	0.72	0.72	0.89

*Factor de envejecimiento = Edad / Vida útil

**Basado en colectores y emisores principales

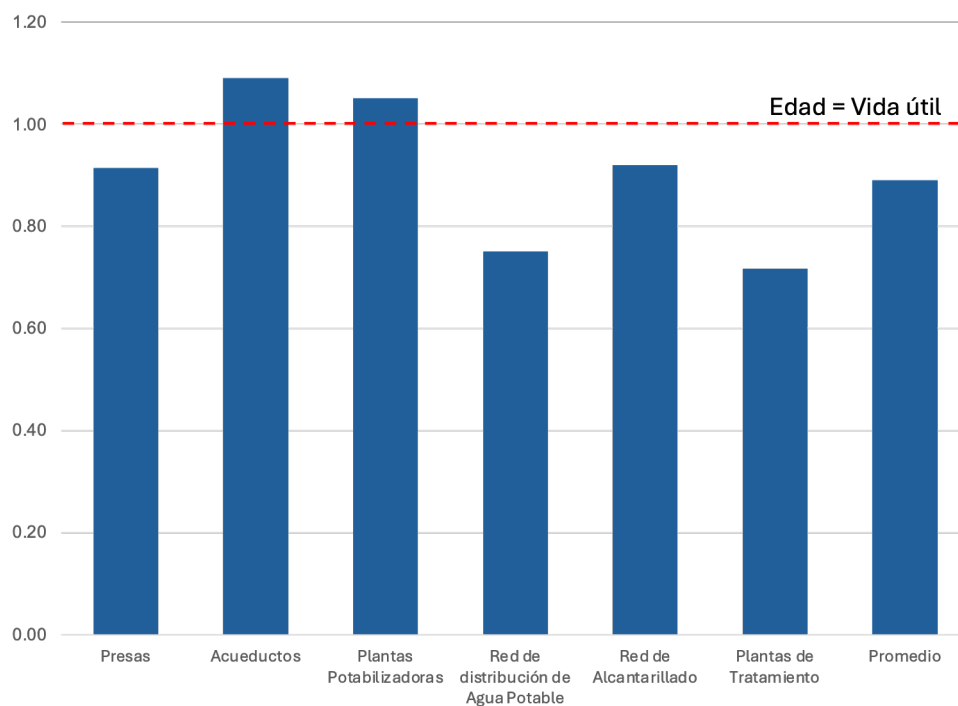
Fuente: Elaboración propia

Figura 5.10. Comparación de los Factores de envejecimiento de las tres metrópolis



Fuente: Elaboración propia

Figura 5.11. Envejecimiento medio en las metrópolis por tipo de obra



Fuente: Elaboración propia

5.5 Comentarios concluyentes

El envejecimiento de la infraestructura hidráulica de las tres principales metrópolis en México es un asunto de interés nacional. Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara representan, cada una por separado y en conjunto, pilares de la economía nacional. En este sentido, conocer el estado de esta infraestructura tiene relevancia no solo para cada metrópoli sino para el país en su conjunto. A pesar de esta relevancia, el tema de su envejecimiento está subestudiado. En este marco se inscriben los resultados de esta investigación.

Si bien en conjunto se comparten ciertas características, los sistemas y subsistemas metropolitanos tienen diferentes patrones de envejecimiento. Para el caso de la Ciudad de México, las prioridades se encuentran, en primer lugar, en el sistema de alcantarillado, así como en las fuentes y acueductos. Un problema creciente, aunque menos crítico lo representan las presas y las plantas potabilizadoras. Las PTARs y las redes de distribución son los sistemas en que se observa menos envejecimiento. El centro histórico de la ciudad cuenta con infraestructura, principalmente redes de distribución de agua potable y de alcantarillado, que claramente ha sobrepasado su vida útil. El promedio, sin embargo, se reduce al incluir infraestructura de reciente construcción, especialmente en la periferia.

De acuerdo con el estado de su infraestructura hidráulica, en Monterrey es necesario prestarle mayor atención a plantas potabilizadoras, acueductos y presas. Las plantas de tratamiento, la red de distribución de agua potable y la red de alcantarillado tienen edades que se encuentran entre dos tercios y tres cuartos de su vida útil. En virtud del crecimiento vertiginoso de las zonas periurbanas y de los valores medios de los factores de envejecimiento, se deduce que en las partes centrales de la ciudad se cuenta con infraestructura con edades mayores a la vida útil por lo cual la atención de esas zonas parece más urgente.

Finalmente, para el caso de Guadalajara, el envejecimiento de su infraestructura sugiere que los acueductos y la red de distribución de agua potable deberían tener prioridad. Las plantas potabilizadoras y la red de alcantarillado, seguido de las presas y las plantas de tratamiento siguen en la línea de prioridades. Al igual que en CDMX y en Monterrey, es en el centro de las ciudades donde los problemas derivados del envejecimiento son mayores.

Considerando las tres metrópolis en conjunto, los problemas de envejecimiento se centran principalmente en acueductos y plantas potabilizadoras. Los otros sistemas de infraestructura requieren, por supuesto, atención en función de su factor de envejecimiento, si han tenido o no mantenimiento, su localización geográfica, y otras condiciones contextuales. Es deseable que el análisis realizado sobre el estado de sus sistemas hídricos ayude a orientar la priorización de las decisiones de mantenimiento, rehabilitación, restauración y eventual sustitución de los activos.

6

Financiamiento e Inversión en Infraestructura Hidráulica en México

Este capítulo presenta un marco económico financiero del agua, ligado a lo que se ha presentado en esta investigación sobre la infraestructura y su envejecimiento y de cómo el financiamiento, siendo tan crucial, se convierte en una gran limitante. Aquí se articulan los capítulos anteriores para subrayar que el país necesitará grandes recursos financieros para mejorar la calidad de la gestión del agua en general y de la infraestructura hidráulica en particular, especialmente a la luz de su envejecimiento. Este es el tema central del proyecto Tec - FGRA y que se documentó en los capítulos 4 y 5. Lo anterior incluye la atención más proactiva de los fenómenos hidrometeorológicos extremos – sequías e inundaciones. Abordar lo anterior requiere de una visión de resiliencia sistémica y la inversión *ex-ante* como parte de enfoques más comprensivos e integrados. Sin embargo, se tiene un problema estructural ante la persistente caída en el presupuesto destinado al sector, lo cual impone grandes retos al país para financiar las inversiones necesarias actuales y futuras. La conservación y modernización de la infraestructura deberán tener mayor prioridad en las inversiones. El financiamiento de las obras resilientes al clima, por lo que ya se ha mencionado, también representa un gran reto. Este asunto se aborda con más detalle en el capítulo 7.

6.1 Financiamiento y presupuesto

6.1.1 Importancia del financiamiento

El adecuado financiamiento de la infraestructura, nueva y de mantenimiento, tiene profundas implicaciones en las actividades económicas y la calidad de vida de la población. Es también el caso de la atención a la infraestructura que envejece. Este es uno de los mensajes centrales del estudio económico 2024 de la OCDE sobre México (**OECD, 2024a**). Esto coincide con el reporte del IMCO, en el sentido de que la buena gestión del agua requiere de inversiones para modernizar y conservar la infraestructura hídrica (**IMCO, 2023a**). Es decir, el financiamiento de la infraestructura no es una cuestión puramente financiera. Si se considera a la infraestructura como facilitador de servicios, su calidad se mide justamente con la calidad de los servicios que ofrece (**Cavallo et al, 2020**). Los activos de infraestructura se interconectan con otros sistemas (**OECD, 2024d**), afectando en cascada, positiva o negativamente a la sociedad y a la economía, precisamente en función de la calidad de esta infraestructura. Esto se enmarca en lo que se encontró en el capítulo 2 al revisar la literatura: se trata de **sistemas de infraestructura**.

En este marco, son muy pertinentes los argumentos textuales de la **OECD (2024d, p. 15)** en torno al financiamiento de la infraestructura resiliente al clima y que también son válidos para la infraestructura en general. La inversión en infraestructura anticipada (*ex-ante*) reduce los costos de operación y mantenimiento y, por lo tanto, los costos de las interrupciones y daños en el servicio. El financiamiento de los futuros climáticos es un tema central en la agenda actual y futura de la infraestructura hidráulica. A contra corriente de estas crecientes exigencias financieras, en los últimos años el país ha sufrido una marcada caída en el presupuesto para el sector agua, lo cual agrava la problemática ya referida en los capítulos 4 y 5 sobre el envejecimiento de la infraestructura hidráulica a nivel nacional y metropolitano.

La atención en políticas públicas efectivas para abordar estos grandes temas requiere de más y mejores inversiones en infraestructura, en el marco de una planeación integrada, financieramente robusta y bien monitoreada. Como lo encuentra la Auditoría Superior de la Federación, las irregularidades más recurrentes en obras de infraestructura realizadas con recursos públicos se refieren a una deficiente planeación y ejecución (**Moreno Pérez, 2023, p. 25**): falta de proyectos ejecutivos completos, deficiencias en procesos de contratación, ineficiencias y faltas de garantía de cumplimiento, vicios ocultos, pagos improcedentes y manifestación de impacto ambiental.

6.1.2 Presupuesto

Sobre el presupuesto y la inversión en agua es necesaria una nota precautoria. La gestión del agua está muy fragmentada y disfuncional. El gran tema del agua tiene conexiones con diferentes niveles de gobierno, entidades, jurisdicciones. En virtud de lo anterior, es muy difícil conocer lo que el país gasta en materia de agua. Esto lo reconoce bien la propia Comisión Nacional del Agua (**CONAGUA, 2011**). En 2013 la OCDE llevó a cabo un ejercicio

para proponer recomendaciones sobre una nueva reforma del sector agua en México (**OCDE, 2013**). En relación con el presupuesto en agua, el informe es consistente con este reconocimiento de CONAGUA. Textualmente se expresaba:

“No se dispone de información sobre el presupuesto completo del sector del agua en México” (p. 159). El presupuesto está incompleto porque no se incluyen gastos efectuados en el sector agua contemplados en otros programas federales de la SAGARPA, CONAFOR, CFE, además de los gastos de estado y municipios. Tampoco se consideran las inversiones hechas por agentes privados y usuarios. (p. 159). De hecho, se estima que los contribuyentes financian un 55% del gasto total del agua (p. 161)

En su más reciente reporte económico sobre México, la OCDE (**OECD, 2024c**) sostiene, al igual que el **IMCO (2023a)**, que se tiene que mejorar la gestión del agua. Avanzar hacia ello requiere de más y mejores datos. Esto se aplica muy bien al presupuesto y la inversión. Con base en el contexto anterior, lo que se presenta a continuación se relaciona solamente con los recursos ejercidos por la Comisión. De cualquier forma, al ser CONAGUA un actor con tanto peso, sí se tiene una idea de la insuficiencia de los recursos financieros y de los retos que de ello se derivan.

Contrariamente a las crecientes necesidades financieras para el sector agua y la infraestructura hidráulica, durante los últimos quince años el presupuesto para la CONAGUA marca una clara tendencia a la baja. El presupuesto correspondiente a 2022 es, en términos reales de ese año, muy parecido al de 20 años atrás (**CONAGUA, 2024b**). Esto se corrigió parcialmente con el presupuesto de 2023, el cual casi dobló el de 2022, al pasar de 36.3 mil millones de pesos (a precios de 2024) a 71.7 mil millones de pesos (**IMCO, 2023b**).

Sin embargo, el presupuesto de 2024 vuelve a mostrar una disminución del orden del 12.7%, al pasar a 62.6 mil millones (**Figura 6.1**). La reducción en el caso de la construcción y mantenimiento de infraestructura hidráulica es todavía un poco mayor (15.7%). El presupuesto de 2023, con todo y el aumento involucrado, es muy similar o incluso menor al de 10 años atrás; solo que ahora las necesidades han crecido y la brecha financiera es mucho mayor.

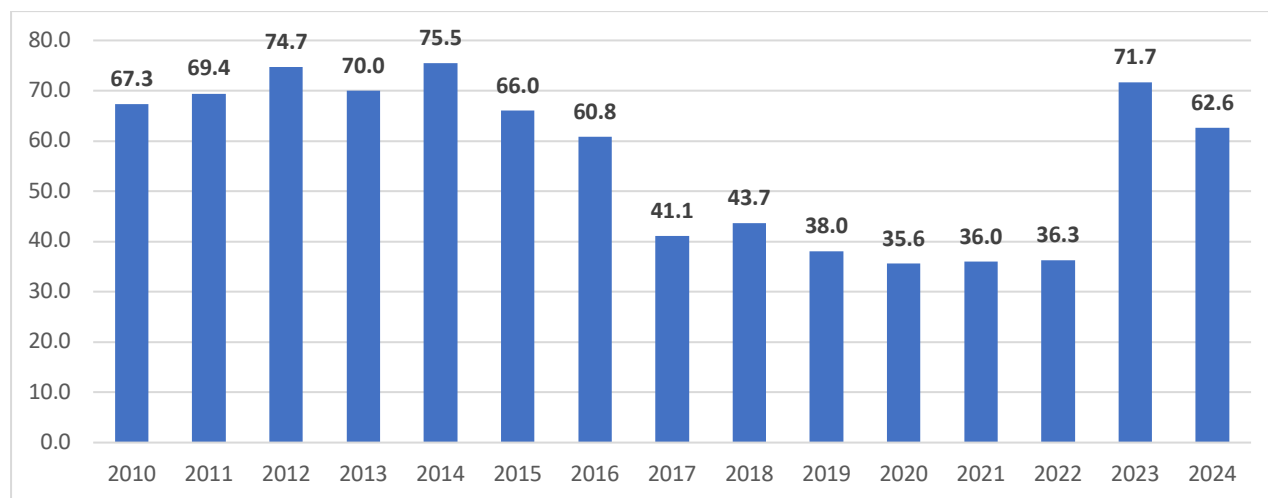
Recortes al presupuesto de CONAGUA en 2025 y 2026

Durante los dos últimos años el presupuesto del sector medio ambiente y recursos naturales (Ramo 16), al que pertenece el tema del agua, y de la Comisión Nacional del Agua en particular han venido sufriendo recortes muy severos. Por ejemplo, en 2025 el presupuesto para el Ramo 16 fue de aproximadamente \$44.4 mil millones de pesos. Este monto representó tan solo el 0.58% del total del presupuesto de egresos de la federación (PEF) para los ramos administrativos, el cual fue de 7.6 billones de pesos.¹ El presupuesto para la CONAGUA fue de aproximadamente \$37,119 millones de pesos, el cual resulta 40.8%

¹La fuente es PEF (2025). El presupuesto total se estimó en 9.3 billones de pesos (PEF, 2025, p.33)

inferior al de 2024 y 45.8% menor al de 2023.² En relación con el gasto programable total del PEF, este presupuesto es de apenas 0.49%.

Figura 6.1 Presupuesto de la CONAGUA, 2010-2024 (MX\$ miles de millones, precios constantes de 2024).



Fuente: IMCO (2024a)

El PEF 2026 continúa asignando recursos muy limitados al sector medio ambiente y agua. El país ejercerá un PEF de 10.19 billones de pesos (**PEF, 2026**) De ese monto, poco más de 7 billones se considera como gasto programable. Esto representa casi el 70% del total.³ Aquí se incluyen las inversiones en programas y servicios. Los otros tres billones se refieren al servicio de la deuda y obligaciones financieras del Estado. Del gasto total, tan solo \$45,564 mil millones se destinan al Ramo 16. Lo anterior representa el 0.45% del PEF total. El presupuesto para la CONAGUA se estima en \$37.7 mil millones de pesos.⁴ Este monto significa el 0.37% del total del presupuesto de egresos y **0.52% del gasto programable**. Esto significa que de cada 100 pesos que el Estado gastará en sus programas, solo 52

² Los datos para esta sección provienen de análisis de ethos.org y de ANEAS con base en los presupuestos de egresos. Las fuentes son las siguientes. https://www.ethos.org.mx/desarrollo-sostenible/columnas/rezagos_en_infraestructura_hidrica_y_recorte_al_presupuesto_de_conagua_en_2026. <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-oficiales/presupuesto-federal-egresos-2025.pdf>

³ El Gasto Programable es de 7 billones 94 mil 708.8 mdp; el restante 30.4 por ciento corresponde a Gasto No Programable, equivalente a 3 billones 98 mil 974.9 mdp. Es de notar que el monto aprobado por la Cámara de Diputados para el PEF 2026 es el originalmente propuesto por el Poder Ejecutivo Federal en el proyecto de PEF 2026. Se realizaron adecuaciones compensadas por 17 mil 788.1 mdp, lo cual significa que la reasignación neta fue cero. Fuente de lo anterior: Cámara de Diputados, CEFP, Nota cefp 163, 25 de noviembre 2025

⁴ Llama la atención que durante la discusión parlamentaria para la aprobación del proyecto de presupuesto de egresos (PPEF), el presupuesto a la Comisión solo se haya incrementado en \$1 mil millones más, lo cual es claramente un incremento muy marginal.

centavos se asignan a CONAGUA considerada en su conjunto (es decir, incluyendo su gasto corriente).

Una mirada más fina al presupuesto de CONAGUA, para considerar solamente la asignación en proyectos infraestructura, operación y servicios de agua, arroja un panorama mucho más desalentador y confirma muy crudamente que el sector agua tiene una bajísima prioridad en la política fiscal del país.⁵ En el Ramo 16 (Medio Ambiente y Recursos Naturales) aparecen programas hídricos explícitos (operación y suministro hídrico, gestión integral, infraestructura de agua potable, drenaje y saneamiento, infraestructura hidroagrícola, apoyos a infraestructura y articulación de políticas hídricas) que en total suman en el PEF 2026 alrededor de \$13,282 millones de pesos.

Por otra parte, en el presupuesto también se consideran programas específicos de infraestructura hidráulica, por un total de \$20,762 millones.⁶ Al considerar solo los programas hídricos explícitos, se tiene entonces que su proporción del gasto programable es de 0.19% (solo 19 centavos de cada 100 pesos gastados se destinan a estos programas hídricos). Aun considerando todos los programas hídricos y de obras de infraestructura – que suman aproximadamente \$34 mil millones – su proporción del PEF total y del gasto programable es de 0.33% y de 0.45%, respectivamente. Lo anterior significa que se destina a proyectos en agua solo 33 centavos de cada 100 pesos del PEF y 45 centavos del gasto programable.

En su análisis, **Fuentes Nava (2025)** calcula que la brecha entre necesidades del sector agua y su presupuesto tan extremadamente pequeño se visualiza mejor cuando este presupuesto se compara con el de otros grandes rubros del PEF. Así, por ejemplo, se tiene que el presupuesto de los Programas del Bienestar (Ramo 20 y sus ampliaciones de otros ramos) es 27 veces superior, y que el de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes (Ramo 09) es cuatro veces mayor. El presupuesto para el Tren Maya es 0.8 veces el de la Comisión; es decir, el presupuesto de un solo proyecto está cercano al de todo un sector que en el discurso se considera como estratégico para México. La evidencia dada por las cifras presupuestales contradice muy claramente esta narrativa oficial.

Desde este análisis más fino, resulta muy evidente que a la luz del total PEF y del gasto programable, las inversiones en proyectos de infraestructura hídrica mantienen una muy limitada significancia. El grueso de las inversiones se destinará a los proyectos considerados como estratégicos, dejando muy poco para la inversión y mantenimiento de la infraestructura hidráulica que envejece y que es el foco de este proyecto de investigación. Las afectaciones al desarrollo económico, social y ambiental del país son evidentes.

⁵ Lo que sigue se basa en la nota de **Fuentes Nava (2025)**

⁶ El desglose de **Castillo (2025)** para el Centro Ethos se basó en el proyecto de PEF 2025, el cual contemplaba un presupuesto para CONAGUA de \$36,689 millones. El presupuesto aprobado fue de apenas \$ 1 mil millones, de tal forma que en general el desglose presentado para gasto corriente y de inversión se considera que no cambió. En este estudio se encuentra que los proyectos de infraestructura tienen un presupuesto estimado de \$21 mil millones. Lo cual se acerca mucho a lo encontrado por **Fuentes Nava (2025)**. En el estudio Ethos también se mencionan \$4 mil millones orientados a programas y subsidios para entidades federales y municipales enfocados principalmente en agua potable y alcantarillado.

Un análisis de *BBVA Research* (**Mora, 2025**) del presupuesto federal aprobado para el periodo 2012-2025, con base en precios constantes de 2022, confirma los hallazgos anteriores. En 2012 el presupuesto fue de \$50,800 millones. Para 2025 el monto fue de \$28,420, lo cual representa una disminución real de 44% en este periodo de 13 años. En el estudio se aclara que el análisis cubre las tres subfunciones dentro del PEF consideradas como sustantivas a la materia hídrica: 212 Administración del Agua; 213 Ordenación de Aguas Residuales, Drenaje y Alcantarillado; y 223 Abastecimiento de Agua. Si bien no se considera la totalidad del presupuesto asignado a la CONAGUA, los resultados son consistentes con lo que se ha visto señalando sobre la baja prioridad de México al tema del agua y de su infraestructura hidráulica. Al centrarse solo en estos programas, se reconoce la enorme dificultad de saber la totalidad del gasto, tal como ya se mostró en la sección 6.1 en estudios tanto de CONAGUA como de la OCDE.

No sorprende que el presupuesto para agua en México está muy por debajo de lo que instituciones nacionales e internacionales recomiendan. De acuerdo con *México Evalúa*, el presupuesto 2026 para CONAGUA es 25% inferior al promedio del sexenio pasado y 38% por debajo del promedio del sexenio antepasado (**Cano, 2025**). Desde su perspectiva, no se proporcionan los recursos para hacer realidad las promesas oficiales en torno al agua. Es más alarmante aún comparar el presupuesto de la Comisión frente al PIB, pues el resultado, como ya se mencionó, es de apenas 0.1%. Aun considerando lo que ya se señaló en el sentido de que la Comisión no es el único actor invirtiendo en agua, seguramente una cifra más completa será de cualquier forma extremadamente baja a la luz de las necesidades.

Esto confirma lo que varias voces del sector agua han venido refiriendo en los últimos años: el tema del agua no es prioritario para el gobierno federal, estas bajísimas asignaciones presupuestales así lo muestran. Estos montos están muy por debajo de lo que expertos y organizaciones internacionales recomiendan. En términos del PIB, el gasto en agua debería estar entre el 1.5 y 2%, o al menos alcanzar el 1%. En relación con las inversiones federales en el sector, estas deberían al menos cuadruplicarse.⁷ De acuerdo con el Consejo Consultivo del Agua, el gasto en agua debería ser al menos de \$150 mil millones de pesos anuales.

Estimaciones del BID para México (**Brichetti et al, 2021, pp. 15 a 20**) indican requerimientos financieros anuales del orden de los USD 65,621 millones hasta el año 2030, para cerrar la brecha del ODS #6 (en materia de agua potable, saneamiento e infraestructura de tratamiento de aguas residuales). Es claro que la inversión realizada en el país está muy lejos de estas estimaciones. Lo anterior es más notable toda vez que las cifras mencionadas son, de acuerdo con el Banco, muy conservadoras, pues no contemplan varios rubros, como la infraestructura de almacenamiento. De estos montos se estima que la infraestructura nueva demanda 68% y 32% la de mantenimiento y reemplazo de activos al alcanzar el final de su vida útil.⁸ Se aprecia con mucha claridad la extrema pequeñez de los recursos al

⁷ En diversos foros se han discutido estas crecientes necesidades financieras, por parte de instituciones como la Red del Agua de la UNAM y el Consejo Consultivo del Agua.

⁸ Se consideran escenarios de máxima inversión. La metodología para estimar estos montos y el detalle de los escenarios se encuentran en el informe. En el caso del tratamiento solo se considera infraestructura nueva. Esto representa un problema pues, como se ha indicado en este capítulo, México tiene muchas

sector agua y su infraestructura, cuando se consideran los montos tan elevados de los daños causados por fenómenos naturales como sequías e inundaciones. Sobre lo segundo, las afectaciones de varios huracanes rebasan fácilmente los \$15, 000 millones. Este tema se presenta con más detalle en el capítulo 7.

Si bien es difícil conocer el total de lo que se invierte en el sector, las serias reducciones en el presupuesto contradicen, como ya se ha señalado, las expresiones oficiales de que el agua es de interés nacional. Más bien, es claro que el presupuesto refleja una prioridad muy baja y riesgosa, como bien lo apuntaban hace pocos años **Provencio y Carabias (2019)** para el sector ambiental en general y de la CONAGUA en particular. Esta preocupación es compartida por otros actores con responsabilidad directa en la toma de decisiones en torno al agua en general y a la infraestructura hidráulica en particular (**Aguirre Díaz, 2014; Athie Flores, 2022**). Al final del día, tiene mucho sentido lo que se expresaba en el Informe 2005 del Banco Mundial sobre las inversiones en infraestructura, incluyendo el agua (**World Bank, 2005**, p. xxviii):

“Inversiones: Cuánto es Gastado y Necesitado, para Quién, y Dónde”

6.2 Inversión en rubros de infraestructura seleccionados

En la sección anterior queda demostrado que el país ha venido recortando muy pronunciadamente el presupuesto al sector agua. Aun cuando no se tiene la información detallada, se infiere que los recursos programados para proyectos de infraestructura hidráulica tienen una proporción menor todavía. Este contexto de limitaciones financieras impone serias restricciones para enfrentar los enormes retos para la construcción, mantenimiento y reemplazo de esta infraestructura.

Si bien se sabe que las inversiones son pequeñas frente a las necesidades, también se ha señalado que es difícil conocer con certeza lo que se invierte en infraestructura hidráulica en México. Está también el hecho de que no siempre se publican sistemáticamente datos sobre estas inversiones, o que su clasificación a menudo dificulta darle seguimiento. La agregación de rubros es otra limitante. Por ejemplo, agrupar ‘Operación y Mantenimiento’ de infraestructura no permite saber lo que se invierte en cada uno de ellos. Se abordó con anterioridad, en el capítulo 4, la limitada información sobre el mantenimiento a las presas y los acueductos.

A nivel urbano también se sabe sobre los exiguos recursos financieros para su infraestructura, aunque de igual forma no se dispone de estadísticas consistentes y de largo plazo sobre lo asignado a su mantenimiento. El trabajo presentado sobre las tres grandes metrópolis se debe a la gran colaboración de sus organismos de agua, y a la investigación que este proyecto hizo sobre el tema. Contar con datos de las inversiones en infraestructura a este nivel no es una práctica común. Es de justicia señalar que la CONAGUA publica, a

plantas abandonadas, entre otras cosas por la falta de recursos para operarlas y mantenerlas. Tiene razón el informe al señalar que se trata de estimaciones conservadoras.

pesar de sus restricciones financieras, series de datos sobre el financiamiento e inversiones de la infraestructura, especialmente en lo referente al subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. *Estadísticas del Agua en México* y el *Reporte de la Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* se han convertido en referentes. Una característica positiva de estas publicaciones es que, a pesar de las limitaciones ya referidas arriba, brindan información sobre los flujos de inversión, tanto en el destino como del origen de los recursos. El nivel de detalle de estos flujos no se encuentra en otras fuentes de datos.

A continuación, se presentan los datos disponibles publicados directamente por la CONAGUA sobre las inversiones en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento (**Tabla 6.1**), en su publicación *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. El presupuesto para el subsector se estimó en 42 mil millones de pesos. La gran mayoría de las inversiones se destinan a agua potable (84%). Solo 5 y 9.5 por ciento van a alcantarillado y saneamiento, respectivamente. Llama la atención que el rubro de mejoramiento de la eficiencia sea prácticamente inexistente (0.5%). Esto es preocupante porque a menudo en esta clasificación se incluye el mantenimiento y la operación. El rubro de ‘Otros’, que no se especifica, representa tan solo un 0.7%.

Otra forma de analizar las inversiones es según la fuente de los recursos (federal, estatal o municipal) (**Tabla 6.2**). Se observa que poco menos del 80% de las inversiones provienen del gobierno federal. Las inversiones de origen estatal apenas se aproximan al 5% y las de origen municipal escasamente superan el 1% del total. Es decir, los estados y municipios mantienen una marcada dependencia sobre los fondos federales. La tabla muestra que efectivamente el municipio constituye el eslabón más débil en la arquitectura financiera del agua en México.

Tabla 6.1 Inversión por rubro de aplicación en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)

Rubro de aplicación	Monto	%
Agua potable	33,445.0	84.2
Alcantarillado	2,117.4	5.0
Saneamiento	4,009.9	9.5
Mejoramiento de eficiencia	229.7	0.5
Otros	289.3	0.7
TOTAL	42,091.3	100.0*

*Cifras redondeadas a un décima. Como es de esperar los montos y porcentajes varían con los años. Solo un año antes los rubros de ‘Mejoramiento de la eficiencia’ y ‘Otros’ representaban, en conjunto, cerca del 15 por ciento. Revisar porcentaje con informe CAF

Fuente: CONAGUA (2024e, Cuadro 1.4, p. 11).

Tabla 6.2 Inversión por origen de los recursos en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023
(Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)

Origen de recursos	Monto	%
Federal	33,177.6	78.8
Estatal	1,974.6	4.7
Municipal	442.2	1.1
Otros+	6,496.9	15.4
TOTAL	42,091.3	100.0*

+Incluye estudios, proyectos y supervisión técnica y participación comunitaria, contraloría social y gasto operativo

*Cifras redondeadas a un decimal

Fuente: CONAGUA (2024e, Cuadro 1.3, p. 10)

El asunto del mantenimiento y rehabilitación de la infraestructura merece ser subrayado. Este rubro, como se ha mostrado, debería ser una parte esencial de la gestión del agua y la planeación en infraestructura. En el capítulo 4 se mostró que parte de estos activos – presas y acueductos, por ejemplo – tienen varias décadas de operación, sin que al parecer se tengan registros sistemáticos de mantenimiento y rehabilitación. Una situación similar se encontró en el capítulo 5 para las tres grandes zonas metropolitanas del país. Esto va a contracorriente del cambio de paradigma que se propone, en el sentido de favorecer el financiamiento anticipado para la resiliencia (**OECD, 2019**), como parte del cambio de pensamiento: de protección de activos a resiliencia sistémica. Ciertamente, la construcción y mantenimiento de la infraestructura hidráulica forma parte de los proyectos prioritarios de la Conagua. El problema, no obstante, es la reducción del presupuesto ya mencionada, de tal forma que éste termina por no reflejar las prioridades declaradas.

Como ya se expresó, resulta difícil contar con información actualizada y completa sobre las inversiones en infraestructura hidráulica y, más particularmente, sobre la operación y el mantenimiento. El *Reporte sobre la Situación del Subsector* tiene un gran valor al proporcionar diversos datos sobre las inversiones en el subsector. Sin embargo, la información proporcionada luce muy agregada, sin saber bien a bien a qué proyectos se refiere. Los datos pueden visualizarse a nivel de los estados, pero en muchos de ellos no se tienen registros, especialmente sobre el mantenimiento. La **Tabla 6.3** contiene las inversiones por rubro de aplicación en el subsector para el año 2023. La tabla se ha simplificado para una lectura más amigable. Vale subrayarse que estos datos se refieren solo a este subsector. Acceder a datos similares de otros subsectores de infraestructura hidráulica no resulta sencillo.

La tabla muestra que, de los 42 mil millones de pesos destinados al subsector, casi 21 mil millones se asocian con lo que se entiende es nueva infraestructura hidráulica. Una quinta parte se orienta a la operación y el mantenimiento, pero sin dar más detalles de estas inversiones. Aun a este nivel de agregación, se observa que los recursos destinados a la operación y el mantenimiento del alcantarillado son muy pequeños. Si bien lucen todavía como limitados, el rubro de ‘Agua potable’ recibió por este concepto 4 mil millones de pesos, frente a los 143 millones para el ‘alcantarillado’. En términos del total asignado a agua

potable, de poco más de 35 mil millones, la operación y el mantenimiento representó tan solo 11%. Cuando la información sobre ‘infraestructura hidráulica’ y ‘Operación y mantenimiento’ se cruza con los estados, se tienen muchos espacios en blanco. Lo cual confirma la dificultad para saber bien a bien lo que el país invierte en estos rubros.

Tabla 6.3 Inversión por rubro de aplicación de los recursos en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México, 2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)

Rubro de aplicación	Proagua 1	Proagua 2	Proagua 3	Infraestructura hidráulica+	Operación y mantenimiento +	Total++
Agua potable	111.3	4,649.7	1,159.0	20,212.7	4,039.0	35,445.0
Alcantarillado	-	1,326.7	313.3	-	142.7	2,117.4
Saneamiento	-	1,158.6	343.7	609.1	-	4,009.9
Mejoramiento de eficiencia	-	229.7	-	-	-	229.7
Otros	-	197.7	91.4	-	0.2	289.3
TOTAL++	111.3	7,562.4	1,907.4	20,821.8	4181.9	42,091.3

Cifras redondeadas

PROAGUA

1 Desinfección de Agua

2 Localidades Urbanas

3 Localidades Rurales

+ Esta información no se reporta para todos los estados.

++: Los totales horizontales no coinciden porque se han omitido los siguientes programas:

PRODDER: 2,403 millones (2,068.3 para Agua potable y 334.7 para alcantarillado)

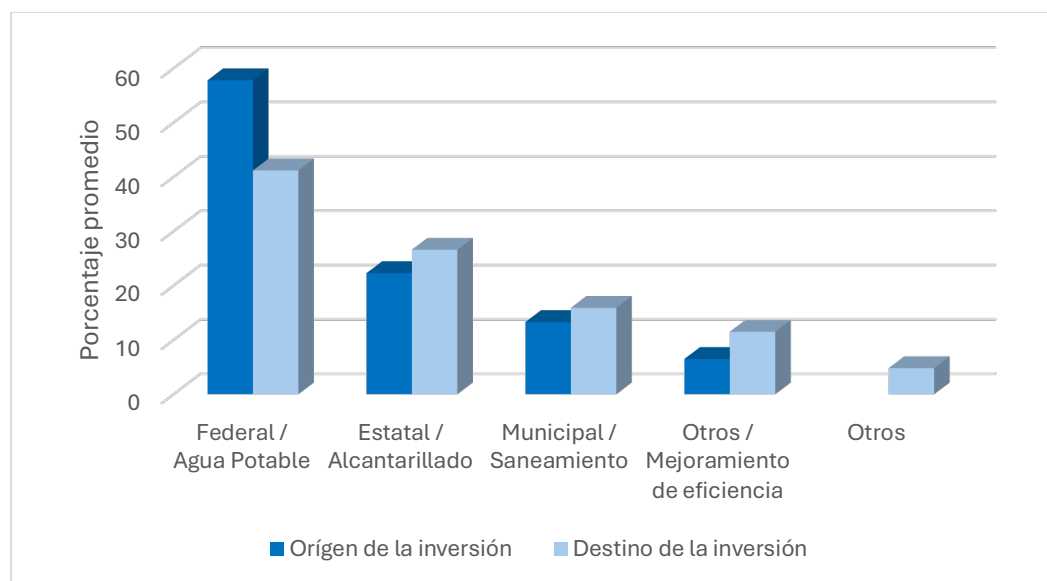
PROSANEAR: 1898.6 Millones. Se refiere a Saneamiento

ZMCM: 3,205 millones. Se refiere a inversiones en agua potable en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (CDMX, 1981.6; y Estado de México, 1,223.4)

Fuente: CONAGUA (2024e, Cuadro 1.4, p. 11)

Una serie más larga permite contar con mayores elementos sobre el origen y el destino de las inversiones en el subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento. Esto se muestra en la **Figura 6.2** para el periodo 1999-2023. Se aprecia, como ya se refirió antes para 2023, que el gobierno federal es la principal fuente de las inversiones, con casi el 60%. Le sigue el nivel estatal con el 22% y el municipal con el 13%. Finalmente, el rubro de ‘Otros’ representa un 6.5%. Por lo que se refiere al destino de los recursos, agua potable es el principal receptor, con casi 40%. Alcantarillado y saneamiento representan aproximadamente el 24% y el 14%, respectivamente. Llama la atención que el rubro ‘Mejoramiento de la eficiencia’ - el cual no se define del todo – apenas constituye un 10%. La **Tabla 6.4** contiene un desglose anual del origen de las inversiones para el periodo completo.

Figura 6.2 Inversiones del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México por origen y destino de los recursos, 1999-2023 (porcentajes promedio)



Fuente: CONAGUA (2024e, Cuadro 1.1 y 1.2, pp. 9,10)

6.2.1 Inversiones en Programas K, 2017-2025

En la terminología presupuestal, los proyectos de inversión se catalogan como K y los de subsidios como S.⁹ En el primer caso se tienen tres programas, con proyectos en solo algunos estados del país:

- K007 para infraestructura de agua potable, alcantarillado y saneamiento. El programa incluye la construcción y el mantenimiento de la infraestructura.
- K129 para infraestructura para la protección de centros de población y áreas productivas.
- K141 corresponde a infraestructura para la modernización y rehabilitación de riego y temporal tecnificado.

El Programa Presupuestal K007 “Proyectos de infraestructura económica de agua potable, alcantarillado y saneamiento”, es un programa de inversión cuyos programas se realizan exclusivamente con recursos de la CONAGUA. El programa se complementa con otros programas y proyectos los cuales tienen otras fuentes de financiamiento (CONAGUA, gobiernos locales y particulares), donde los recursos que aporta CONAGUA son vía subsidios.

⁹ Este apartado se basa en análisis llevado a cabo por ANEAS sobre el presupuesto 2025 para la CONAGUA.

Tabla 6.4 Inversiones del subsector agua potable, alcantarillado y saneamiento en México por fuente de los recursos, 1999-2023 (Millones de pesos corrientes. En monto y porcentaje)

Año	Federal %	Estatad %	Municipal %	Otros + %	Total	Total %
1999	59.1	27.4	7.5	5.9	2,741.0	100.0
2000	54.5	33.9	2.7	8.8	3,911.1	100.0
2001	38.7	27.3	11.5	22.5	2,725.5	100.0
2002	47.1	28.1	19.4	5.4	3,578.7	100.0
2003	44.9	28.2	24.9	2.1	7,358.8	100.0
2004	42.9	35.7	15.3	6.1	7,200.6	100.0
2005	42.6	33.1	18.0	6.3	14,483.0	100.0
2006	46.3	22.6	22.9	8.2	11,125.8	100.0
2007	52.9	24.3	15.2	7.6	15,649.4	100.0
2008	52.8	29.0	14.3	3.9	20,292.2	100.0
2009	56.5	22.4	13.1	8.0	22,572.7	100.0
2010	62.4	21.4	13.2	3.1	22,062.4	100.0
2011	61.2	23.0	11.2	4.6	28,596.9	100.0
2012	68.6	19.3	7.6	4.5	34,287.9	100.0
2013	67.2	18.2	9.4	5.2	29,423.3	100.0
2014	66.5	20.0	9.2	4.3	25,168.1	100.0
2015	74.1	14.0	9.6	2.4	27,873.8	100.0
2016	70.9	12.6	11.3	5.3	29,383.5	100.0
2017	60.2	22.6	15.7	1.5	18,987.0	100.0
2018	48.9	10.1	13.1	27.8	20,016.4	100.0
2019	64.4	30.2	4.2	1.3	12,840.4	100.0
2020	57.9	20.0	22.0	0.0	13,117.1	100.0
2021	50.0	25.6	24.4	0.0	12,258.8	100.0
2022	75.8	4.8	16.4	3.0	29,436.6	100.0
2023	78.8	4.7	1.1	15.4	42,091.3	100.0
Promedio	57.8	22.3	13.3	6.5		100.00

Cifras redondeadas +Incluye estudios, proyectos y supervisión técnica y participación comunitaria, contraloría social y gasto operativo

Fuente: CONAGUA (2024e, Cuadro 1.1, p. 9)

En el pasado reciente estos programas tuvieron su mejor año en 2023, con poco más de 49 mil millones de pesos. Para 2024 su presupuesto se redujo a 35 mil millones. Para 2025 se tuvo una disminución de 81% en relación con 2024. La principal afectación ocurrió en el programa K007, al pasar de 10 mil 792 millones de pesos a tan solo 288 millones para 2025 (**Tabla 6.5**). Llama la atención que no se identifican asignaciones para el programa K111, anteriormente referido a la rehabilitación y modernización de presas.

Los programas de subsidios S se refieren a administración del agua y agua potable (PROAGUA), y a lo hidroagrícola. En relación con 2024, en general los subsidios se redujeron 8.5% y más particularmente 17% en el caso del agua potable (S074). El programa S074 es también conocido como "Agua Potable, Drenaje y Tratamiento", y está orientado a mejorar el acceso a servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento en zonas urbanas y rurales. En 2017, este programa se fusionó con el de Tratamiento de Aguas Residuales (S218). Datos obtenidos directamente del PEF muestran que los subsidios aprobados para la Administración del Agua y Agua Potable son del orden de los \$2,186 mil millones; los subsidios hidroagrícolas ascienden a \$1,858 mil millones (**PEF 2025, p. 117**).

Tabla 6.5 Evolución del Presupuesto de Programas de Inversión K asignado en el PPEF, 2017-2025 (millones de pesos)

Año	Monto
2017	11,272.30
2018	11,694.60
2019	6,911.80
2020	6,195.70
2021	9,535.20
2022	17,244.60
2023	49,389.00
2024	35,343.42
2025	6,682.13

Fuente: ANEAS <https://aneas.com.mx/wp-content/pdf/documentos-oficiales/presupuesto-federal-egresos-2025.pdf>

Evaluación 2015 CONAGUA-SEMARNAT del programa K007

En 2015 la CONAGUA y SEMARNAT comisionaron una Evaluación de Consistencia y Resultados del Programa K007 Proyectos de Infraestructura Económica de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Sus resultados son muy reveladores de la problemática existente en el país sobre el desempeño del gasto en agua en general y, como en este caso, en proyectos de infraestructura de agua potable alcantarillado y saneamiento.¹⁰ Este trabajo externo señala como desde el diseño hasta la evaluación de resultados, el programa K007 no tiene una definición clara de los proyectos a ejecutar, ni de qué se quiere lograr; tampoco de los indicadores y criterios de evaluación.

Tal como se expresa textualmente en las conclusiones, en el apartado de planeación (p. 74):

“La CONAGUA cuenta con un mecanismo de planeación, sin embargo, no contempla las metas que debe alcanzar el programa K007. Por tal motivo, se considera necesario elaborar

¹⁰ Esta evaluación externa es del 15 de octubre. El contrato es el CNA-SGP-008-2015. En esta dirección se encuentra esta evaluación. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/54049/K007_ECyR_completo.pdf

un plan estratégico propio del Programa donde se incluya el Fin y el Propósito del Programa. El Programa K007 no cuenta con un Manual de Operación y Procedimientos o documentos normativos, lo que impide visualizar su operación en relación a las solicitudes de obras, así como de la selección, ejecución y de seguimiento de la ejecución de las mismas. En este sentido, se recomienda que se elabore un Manual de Operación y Procedimientos del Programa, tomando como base los lineamientos y manuales que se tienen para los programas complementarios y para la CONAGUA en su conjunto”

En las conclusiones también se presenta un apartado sobre la medición de resultados, el cual tiene una gran significancia para este proyecto Tec-FGRA. Se incluye textualmente el hallazgo en cuestión (p. 75):

“Las acciones llevadas a cabo por el Programa no han dado los resultados positivos esperados, tanto en el Fin, como en el Propósito, y resultan insuficientes para cumplir con el Propósito y con el logro del Fin. De hecho, existen diferencias en la periodicidad de medición de los indicadores de estos niveles, ya que mientras en algún indicador se refleja un avance, en el otro no se reporta ningún resultado. Dada la importancia que tiene el contar con indicadores que permitan medir el logro del Fin, se sugiere la revisión y reformulación de los indicadores, como ya se señaló en el apartado de diseño”.

“Los indicadores del Propósito miden población beneficiada y los indicadores del Fin miden metros cúbicos, por lo que no existe claridad de cómo el cumplimiento del Propósito contribuye al logro del Fin. Además de su revisión, se recomienda que la cobertura de población sea el Fin y la población beneficiada o la capacidad del servicio proporcionado sea el Propósito. No existe una evaluación de impacto del Programa, se recomienda que se programe su realización”.

En la siguiente sección – centrada en la necesaria reforma al sistema económico financiero del agua - se brinda un marco más amplio para ubicar las implicaciones de lo que se ha referido aquí. El apartado 6.3.1 (Efectividad, eficiencia y fiscalización del gasto e información sobre infraestructura hidráulica) se encuentran lazos directos.

6.3 Reforma al sistema económico financiero e institucional

6.3.1 Necesidad de la reforma

No es difícil argumentar que se requiere una profunda reforma en el sistema económico-financiero e institucional del agua en México, para atender más decididamente el tema del envejecimiento de su infraestructura hidráulica. Frente a un financiamiento pronunciadamente a la baja, las necesidades de gasto se incrementan aceleradamente, a causa del envejecimiento de la infraestructura, el incremento poblacional, y las demandas de los distintos sectores económicos por más y mejores los servicios de agua y saneamiento de calidad.

Es bien conocida la fragilidad financiera de la mayoría de los organismos operadores que suministran el agua a las poblaciones mexicanas. Pocos de ellos tienen tarifas que cubran la operación, mantenimiento y conservación de la infraestructura. Muchos menos incluyen los costos de renovación, inversión y amortización de activos. En el mismo tono, también se

tendrían que corregir las distorsiones de un sistema tarifario de uso público urbano muy regresivo y poco sostenible. Aquí se ha mostrado que el financiamiento constituye una barrera estructural.

Como bien lo apuntó el diario *El País* (26 de noviembre de 2023) en su reportaje *México Seco, la batalla más grande la libra el guerrero más débil*. Este problema inicia en la propia Constitución, al conferir, según el Artículo 115, a los municipios, - el nivel de gobierno más débil – la responsabilidad de ofrecer un servicio tan fundamental como el agua. A este contexto ya de suyo restrictivo, se le tiene que adicionar las presiones impuestas a los municipios al también tener que cumplir con el Art 4 constitucional de derecho humano al agua y al saneamiento. Esta se percibe como una falla de diseño institucional y regulatorio que tendría que cambiar, para prestar servicios de agua de mayor calidad a la población y las actividades productivas, en un modelo financiero más sostenible. Una pregunta de fondo es de dónde provendrán los recursos financieros que el país necesita en materia de agua en general y para su infraestructura hidráulica en particular. En esta reforma eventualmente se tendrá que fortalecer la participación privada y de la banca multilateral. Como bien lo asienta este mismo diario, *poner orden en la casa ya no puede esperar*.

Además de cuantiosos recursos - no solo para infraestructura nueva sino también para la operación y conservación de la existente, se requieren mejores inversiones, en el marco de objetivos pertinentes y de, precisamente, métricas apropiadas. Como se expresó, es difícil saber con certeza cuánto se invierte en el sector agua en su conjunto, pero también cómo y en qué. El estado actual de las estadísticas sobre el tema no facilita saberlo. La clasificación del gasto y su ejercicio por diferentes entidades, con distintos detalles de desagregación complican la tarea. Esto que se ha venido refiriendo en la literatura internacional (**Rozenberg y Fay, 2019**), ya se había señalado con toda claridad hace 30 años en el Informe Mundial del Desarrollo 1994, centrado sobre la infraestructura *para* el desarrollo (énfasis de la publicación): La cantidad de inversión no puede ser el único eje de las políticas. También **es fundamental mejorar la calidad de las inversiones en infraestructura. (Banco Mundial, 1994)**. Lograr lo anterior va a necesitar de una profunda reforma institucional y de orientar los incentivos para este propósito. No parece que esto se tenga que ver como opcional sino como una urgencia inaplazable.

Este llamado guarda correspondencia con el mensaje central del Estudio Económico 2025 de la CEPAL – centrado sobre los desafíos del financiamiento para el desarrollo en América Latina y el Caribe - se necesita renovar la arquitectura fiscal, financiera e institucional. En este marco, “la movilización de recursos financieros tiene una relevancia estratégica, no solo para sostener la estabilidad económica, sino también como catalizadora de un desarrollo más productivo, inclusivo y sostenible” (**CEPAL, 2025, p. 13**). Sin embargo, y en concordancia con lo expresado por el informe del Banco Mundial ya referido, no es solo una cuestión de más recursos sino también de mejor gobernanza, cooperación internacional reforzada y liderazgo político (CEPAL, 2025, p. 15). En esta perspectiva más amplia se enmarca el análisis del financiamiento para la infraestructura hidráulica en México, particularizando la cuestión de su infraestructura que envejece.

6.3.2 Efectividad, eficiencia y fiscalización del gasto e información sobre infraestructura hidráulica

Invertir y gastar mejor es un buen principio, e ineludible cuando los recursos son limitados o decrecientes. En este contexto, se tiene la exigencia de efectividad y eficiencia en el gasto público. El país tiene mucho que avanzar, en general y particularmente en el sector agua (e infraestructura hidráulica). Así lo han venido señalando las revisiones del gasto público del Banco Mundial para el país en su conjunto (**World Bank, 2005; 2016**) y la correspondiente al sector agua (**Banco Mundial, 2007**). En relación con esta última, los puntos 3.25 y 3.26 que muestran muy claramente las deficiencias detectadas desde entonces en el monitoreo, evaluación y control del gasto público en agua. Estas deficiencias también van a ser señaladas, más recientemente, por la Auditoría Superior de la Federación (ASF). En todos los casos, se ve como una seria debilidad el que la CONAGUA no reporte información completa sobre el gasto en los diferentes programas de gestión e infraestructura.

3.25 “El sistema actual autoriza anualmente proyectos individuales y paquetes presupuestales, poniendo insuficiente atención a la efectividad y eficiencia del gasto sectorial...Existe poca información sobre qué tan buenos o malos son los resultados, y esa información rara vez incluye las consecuencias presupuestarias...Adicionalmente, no existe un mecanismo para analizar anticipadamente y monitorear y evaluar posteriormente los efectos de las inversiones relacionadas con el aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos” (p. 101).

3.26 “Actualmente, la SHCP no recibe información apropiada para saber si los fondos fueron proporcionados a la unidad ejecutora como fue programado, si estos fueron utilizados para los propósitos convenidos, si su aplicación se tradujo en mejora de servicios, o en reducción de la contaminación o la sobreexplotación de los recursos hídricos, y a qué costo. Los gobiernos sub-nacionales no elaboran informes periódicos sobre el uso de las transferencias federales;...tampoco existe un informe estandarizado sobre el desempeño de las empresas de AAS (organismos operadores), distritos de riego y unidades de riego...no existen normas ni sanciones por no dar la información. Esto impide que se responsabilice a la clientela local y que se planifique a nivel estatal y municipal”. (p. 101). (Referencia textual)

Auditoría Superior de la Federación

Se presentan a continuación ejemplos de auditorías de desempeño llevadas a cabo por parte de la ASF en 2019, en relación directa con programas de la Comisión Nacional del Agua. Se puntualizan ciertas observaciones y comentarios de la entidad fiscalizada, para ilustrar de mejor forma los puntos de fondo de las auditorías en relación con la infraestructura hidráulica. Debe notarse que parte de la problemática detectada – como es el caso de la insuficiente inspección de las presas – tiene que ver con cuestiones estructurales, como la disminución en el presupuesto a la Comisión, que ya se ha mencionado.

Comisión Nacional del Agua, Sistemas Meteorológicos e Hidrológicos

ASF - Auditoría de Desempeño: 2019-5-16B00-07-0211-2020

211-DS

Objetivo: Fiscalizar que la CONAGUA integró y actualizó la información hidrológica, de calidad del agua, meteorológica, climatológica y de infraestructura hidráulica, **a fin de que la población cuente con datos confiables** (nuestro énfasis).

Evaluación del Control Interno del programa presupuestario E006

El resultado de la evaluación del cumplimiento de la Norma General cuarta de control interno fue el siguiente:

La falta de mecanismos por parte de la CONAGUA que aseguraran que en cada proceso existiera un **mecanismo para generar información relevante y de calidad (accesible, correcta, actualizada, suficiente, oportuna, válida y verificable)** (énfasis añadido por los autores), **de conformidad con las disposiciones legales y administrativas aplicables** (énfasis añadido por los autores); que dentro del sistemas de información se genera de manera oportuna, suficiente y confiable, información sobre el estado de la situación contable y programático-presupuestal del proceso, y que dicho sistema de manera integral, oportuna y confiable permitiera a la alta dirección y, en su caso, al Órgano de Gobierno realizar seguimientos y tomar decisiones.

Elaboración de informes de inspección de presas

“Respecto a la reducción de metas de 150 a 110 visitas de inspección, se señaló que el programa original consideraba la realización de 150 inspecciones de seguridad de presas y que debido a la reducción de personal en los Organismos de Cuenca y Direcciones Locales aproximadamente en mayo, fueron despedidos técnicos capacitados y especializados en seguridad de presas con los conocimientos y experiencia requeridos para realizar las actividades, por lo cual se vio impactado en avance del programa (...) que impactó gravemente a capacidad de respuesta en seguridad de presas. Asimismo, señaló que para resolver dicha situación se requería capacitación para realizar dichas actividades, pero en 2019 el presupuesto para este efecto fue reducido y no hubo la posibilidad de contratarla y preparar personal técnico, por lo que se redujo el alcance de programa a 110 inspecciones”. (subrayados propios)

Comisión Nacional del Agua, Conducción de las Políticas Hídricas

ASF - Auditoría de Desempeño: 2019-5-16B00-07-0199-2020

199-DS

Como parte de las auditorías de desempeño, la ASF indica las disposiciones jurídicas y normativas incumplidas. Para el caso particular de esta auditoría, se determinaron incumplimientos de, entre otras, las siguientes leyes, reglamentos y disposiciones normativas:

1. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: Art. 26 apartado A; Art. 134 Par. Primero.

2. Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria: Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria: Art. 4 Pár. segundo; Art. 24; Art. 27 Par. segundo; Art. 45 Par. primero, cuarto y segundo; Art. 52 Par. cuarto y segundo; Art. 66 Frac. III; Art. 73 Frac. I.

3. Ley General de Contabilidad Gubernamental: Art. 2; Art. 16; Art. 36.

4. Ley General de Responsabilidades Administrativas: Art. 7 Frac. I y VI.

5 Guía para el diseño de indicadores estratégicos: Apartado IV. "Frecuencia de medición". (nuestro énfasis)

6.4 Comentarios concluyentes

El agua es esencial para el desarrollo económico y social del país. La atención a una mayor calidad de sus servicios es una tarea apremiante. Esto pasa necesariamente por mejorar la infraestructura hidráulica y poner atención a su envejecimiento. Sin embargo, esta necesidad actual y futura se enfrenta a una situación de debilidad institucional y financiera. Si bien la información es incompleta, si se sabe que los últimos años México ha venido registrando una sistemática caída en el presupuesto e inversión en el sector y en su infraestructura hidráulica.

El presupuesto más reciente (2026) para la CONAGUA, es solo una muestra. Las cifras hablan por sí mismas: 0.1% del PIB, 0.33% del PEF, y 0.45% del gasto programable. Toda vez que estas cifras se refieren a la Comisión en su conjunto, al considerar los programas relacionados con la infraestructura, se infiere que los recursos son todavía más limitados. Aun considerando inversión en entidades distintas a CONAGUA, los montos se consideran extremadamente pequeños para atender bien los retos de una infraestructura que envejece. Esta situación contradice las expresiones oficiales de que el agua es de interés nacional.

Por supuesto, está también la exigencia por una mejor calidad del gasto en agua en general y en infraestructura hidráulica en particular. Hay tareas pendientes en materia de efectividad, eficiencia y fiscalización del gasto. Se tiene la necesidad de saber con más certidumbre en qué y cómo se gasta. Lo encontrado en el capítulo sobre la evaluación a programas de la Comisión indica que no se trata solamente de gastar sino de hacerlo bien.

Dado lo apremiante para México de atender el envejecimiento de esta infraestructura - lo cual se ha documentado en los capítulos 4 y 5 para el país en su conjunto y sus tres grandes metrópolis en particular – es esencial contar con información más detallada de los flujos destinados a la infraestructura hidráulica, no solo a los nuevos proyectos sino también a la conservación.

Las nuevas exigencias de una infraestructura resiliente al clima solo acentúan – y previsiblemente lo hará más en el futuro – las consecuencias de inversiones tan extremadamente limitadas. El financiamiento de estos futuros climático constituye un gran reto para el país, cuyo abordaje requerirá necesariamente incrementar el presupuesto federal para reflejar más en la realidad las prioridades expresadas en el discurso oficial de

que el agua y su infraestructura son de relevancia estratégica. El tema de los fenómenos hidrometeorológicos extremos y la infraestructura resiliente es el foco del capítulo 7.

Fenómenos Hidrometeorológicos Extremos e Infraestructura Resiliente al Clima: Impactos y financiamiento en México

México es un país expuesto a fenómenos hidrometeorológicos extremos, principalmente en la forma de sequías e inundaciones. Si bien difícil de entender y cuantificar, sí se sabe que estos eventos tienen profundas afectaciones en la población y en la economía. En tiempos recientes, los huracanes han golpeado severamente varios estados del país, siendo Guerrero y Oaxaca casos muy ilustrativos. También lo es el caso del Área Metropolitana de Monterrey, expuesta a los dos extremos de sequías y huracanes (con las correspondientes inundaciones que a menudo éstos últimos generan). Una asignatura urgente es la construcción de infraestructura hidráulica más resistente al clima, así como el mantenimiento adecuado de la infraestructura existente, como parte de enfoques más preventivos.

Esto, necesariamente debería ir acompañado de mayores recursos financieros, lo cual va a contracorriente de lo que se ha mostrado en el capítulo anterior: un descenso pronunciado y sistemático en el presupuesto al sector agua en general y a la infraestructura hidráulica en particular. En este capítulo se muestra que las inversiones para la atención de estos fenómenos son extremadamente limitadas, lo que refleja un grave debilitamiento de la arquitectura institucional, programática y financiera que se había construido. Los retos actuales y futuros indican que el país tendría que encontrar las formas de revertir esta tendencia.

7.1 El Contexto nacional

México está ubicado en una zona propensa a la ocurrencia frecuente de fenómenos hidrometeorológicos extremos (sequías e inundaciones). Estos eventos presentan impactos muy significativos en las poblaciones y actividades productivas. En el contexto del *nearshoring* – o relocalización de actividades productivas y las cadenas de suministro – la atención a estos eventos mantiene una relevancia estratégica; así como también la tiene la **infraestructura hidráulica (IMCO, 2024a)** (énfasis del IMCO)

En 2010 se calculó que el impacto económico directo total de los desastres naturales fue de MX\$92,146 millones (**CENAPRED, 2014**). Las principales afectaciones se asocian con los huracanes *Alex*, *Karl* y *Mattheu*. En 2022 el Centro Nacional de Prevención de Desastres publicó su informe anual sobre el impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en el país (**CENAPRED, 2022**). Los daños se calcularon en MX\$16,600 millones.

El entendimiento de estos fenómenos requiere de enfoques más comprensivos. Las estimaciones de impactos involucran daños y costos directos e indirectos, tangibles e intangibles (**Sisto et al, 2011; Arreguín Cortés et al, 2016a; Mendoza Tinoco et al, 2019**).¹ Es decir, las sequías y los huracanes se tendrían que considerar como parte de un solo sistema climático. En ciertos contextos los huracanes también traen beneficios, al constituirse en providenciales proveedores de agua. Se trata entonces de, en casos como Monterrey, construir resiliencia a los daños y quedarse con los beneficios de tener más agua.

De hecho, en la práctica ha sido la llegada de estos fenómenos y de lluvias extraordinarias, más que las políticas públicas, lo que ha salvado a la ciudad, y a otras ciudades y regiones de México, de los estragos de las sequías (con frecuencia muy prolongadas). El rescate natural más reciente para Monterrey lo trajo la tormenta ‘Alberto’, entre el 19 y el 21 de junio de 2024. Habría que recordar que durante 2022 y hasta antes de ‘Alberto’ la metrópoli enfrentó una escasez muy severa. Es por ello que, como se expresa más adelante, las sequías y los huracanes son las dos caras de la misma moneda climática. El caso Monterrey muestra, efectivamente, la existencia de esta especie de *suerte climática*.

Pero esta especie de *suerte* también puede operar en el sentido contrario. Por ejemplo, diversas localidades de Guerrero, siendo Acapulco el caso más llamativo, apenas se empezaban a recuperar de los estragos dejados por el Huracán Otis en octubre de 2023, cuando volvieron a ser afectadas por el Huracán John, en septiembre de 2024. Las afectaciones en estos estados han magnificado las de apenas un año atrás. A pesar de los esfuerzos llevados a cabo por el gobierno federal para atender estos fenómenos con un enfoque más preventivo, se siguen privilegiando estrategias reactivas, en un contexto de debilitamiento institucional y financiero, como se ha mostrado en los capítulos 1 y 6.

¹ El CENAPRED reconoce que sus estimaciones se deben tomar con reservas (**CENAPRED, 2022, p. 6**). Se destaca que se sigue la metodología *Damage and Loss Assessment*. Para el Centro resulta indispensable señalar que las cifras pueden diferir debido a la actualización de algunos costos, llevada a cabo por el equipo investigador o por las instituciones públicas que sirven como fuente.

La infraestructura hidráulica mantiene diversas relaciones con los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Por una parte, estos fenómenos representan amenazas naturales contra la infraestructura, lo que afecta adversamente a las poblaciones y a las actividades económicas (**OECD, 2019**). Por otra parte, la infraestructura desempeña un papel central en las estrategias orientadas a la prevención, mitigación y adaptación a las sequías e inundaciones. Más específicamente, la infraestructura de calidad y resiliente al clima es una gran exigencia (**Stewart et al, 2024**). Esto se ha señalado para México y también en la arena internacional. Lo anterior tiene una enorme significancia, precisamente ante los riesgos asociados con la variabilidad climática y que previsiblemente se acentuarán con el cambio climático. En este sentido, es muy pertinente el mensaje central del Reporte de Riesgos Globales 2023 (**WEF, 2023**): el abordaje de las apremiantes crisis actuales no implica perder de vista los riesgos del largo plazo. Al final del día, en síntesis, la gestión del agua y de la infraestructura hídrica significan manejo del riesgo.

En 2020 el Banco de México (Banxico), en coordinación con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, en concordancia con la tendencia internacional, publicó el reporte *Riesgos Climáticos y Ambientales y Oportunidades de Negocios en el Sistema Financiero Mexicano* (**Banxico, 2020**). Para Banxico solo unas cuantas instituciones financieras tienen un sistema de gestión que incorpore riesgos ambientales y sociales en su portafolios de negocios porque no lo ven como un beneficio. Además, se encontró que el uso de información relevante para el análisis de estos riesgos era escaso, principalmente de tipo cualitativo, y rara vez basados en datos. También se argumenta que la divulgación de información pertinente al tema es limitada. Lo anterior tiene mucho fondo, toda vez que estimaciones recientes de Banxico muestran que 14% del portafolio de crédito de los municipios está expuesto a los riesgos de los huracanes (**OECD, 2024c**).

7.2 Impactos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos

7.2.1 Sequías

El país es naturalmente vulnerable a las sequías, toda vez que poco más de la mitad de su territorio tiene un clima árido o semi-árido.² Si bien la aridez del territorio no necesariamente se iguala con la escasez de agua, o con la inseguridad hídrica (**Martínez López et al, 2021**), sí se tiene una asociación natural, cuyo entendimiento se debe traducir en una buena

² La fuente y descripción casi textual de esta nota proviene de la revista *Atmósfera*, del Instituto de Ciencias y Cambio Climático, de la UNAM (**Martínez López et al, 2021**). El SMN concibe cuatro tipos de sequía. La sequía meteorológica se refiere a la disminución de la lluvia por debajo del promedio climatológico. En la sequía agrícola la insuficiente humedad se puede traducir en pérdidas de la cubierta vegetal y la productividad de los cultivos. La sequía hidrológica se presenta cuando no hay los suficientes suministros de agua superficial y subterránea. En la sequía socioeconómica se visibilizan los impactos económicos, sociales y ambientales que afectan significativamente a la población. El Monitor de Sequía en México mantiene cinco grados de sequía: Anormalmente Seco (D0), Sequía Moderada (D1), Sequía Severa (D2), Sequía Extrema (D3), y Sequía Excepcional (D4). Los detalles de esta clasificación se encuentran en esta publicación.

gestión del recurso. Dos terceras partes del país registran estrés hídrico.³ Esta situación afecta primordialmente a las regiones norte y centro de México, donde paradójicamente, reside la mayor parte de la población y se concentra el grueso de las actividades económicas. Más específicamente, se estima que la mayoría de las sequías ocurren en estas regiones (**IMCO 2023a** con datos del Servicio Meteorológico Nacional. Esto contrasta con el gran peso económico que mantienen los estados fronterizos y el Valle de México, por ejemplo, al generar 21% y 25% del PIB, respectivamente.

Durante los últimos 20 años las sequías han aumentado en duración e intensidad, con impactos severos en el suministro de agua a las poblaciones y en las actividades económicas, especialmente en la agricultura y en la ganadería.⁴ La sequía de los años 2011-2012 ha quedado como un referente, ya que casi todo el país sufrió de alguna forma este fenómeno. Para **Martínez López et al (2021)**, esta sequía se constituyó en la segunda más grave de los últimos 80 años. Las pérdidas económicas podrían haber alcanzado hasta MX\$150 mil millones, con afectaciones a cerca de 300 mil personas del sector agrícola y ganadero.

El año 2021 fue también muy adverso en relación con la presencia de sequías. Según los autores anteriores, ésta fue la segunda sequía más severa del registro reciente. En junio de 2011 el 85.1% del territorio nacional se encontraba en algún grado de sequía, y el 47.3% en grados de extrema a excepcional. En abril de 2021 los porcentajes, en el mismo orden, eran de 75.3 y 15.2. El volumen almacenado en las principales presas estaba a dos terceras partes del almacenamiento total; en la región norte el porcentaje descendió al 40% (INEGI, Principales presas según capacidad de almacenamiento, en portal cuéntame.inegi.org.mx/territorio/agua/presas.aspx?tema=T)

No es de extrañar que hayan sido las regiones norte y centro las más afectadas por las sequías. En la cuenca del río Bravo (Región VI) se tiene, además, el compromiso internacional de entrega de agua a los Estados Unidos de América, de conformidad con el Tratado Internacional de Distribución de Aguas de 1944. Esto último aumenta la presión, ya de por sí muy intensa, sobre la disponibilidad de agua en la cuenca. Como bien se ha documentado en la prensa nacional e internacional, durante diciembre de 2025 y enero de 2026 México ha tenido que usar agua de la cuenca del río San Juan (Concretamente de la

³ El estrés hídrico ocurre cuando la demanda de agua es más alta que la cantidad disponible durante un periodo determinado.

⁴ La Conagua clasifica los rubros de daño de las sequías en económicos, ambientales y sociales. Los daños económicos se expresan, textualmente, como: Pérdida de producción agrícola, pecuaria, forestal y pesquera; recesión en la tasa de crecimiento económico regional; pérdida de ingreso a productores, comerciantes, transportistas, entre otros afectados; Aumento en la demanda de energía; decremento en industrias y actividades asociadas o dependientes; desempleo y tirantez de créditos y actividad bancaria, así como de menor flujo de activos; y disminución de ingresos y beneficios vía impuestos. Los efectos ambientales se manifiestan en: Daño a los ecosistemas; erosión y pérdida del suelo; degradación de la calidad del agua y aire; y degradación del paisaje. Los impactos sociales se expresan como: Escasez de cantidad y calidad de alimentos; Problemas de salud en sectores vulnerables; conflictos entre usuarios y sectores del agua; desigualdad en la absorción del impacto; disminución de la calidad de vida e incremento de la pobreza; e inestabilidad social y migración hacia áreas urbanas o al extranjero.

Fuente: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/628852/Efectos_o_impactos_de_la_sequ_a.pdf

presa El Cuchillo) para abonar al déficit de entregas con los Estados Unidos. Si bien estas entregas de alguna forma tienen un sustento en la minuta 331, firmada por la CILA/IBWC (el 7 de noviembre de 2024), es también de reconocer que de origen esta cuenca no forma parte de los tributarios mexicanos acordados para la entrega de agua al vecino país. Por lo que se refiere al Valle de México (Región XIII), ésta es la más densamente poblada, pero con la menor cantidad de agua renovable anual del país (0.75% frente a un consumo de 4.9%). Además, esta región tiene el agravante de su vulnerabilidad ante las inundaciones, **derivado de la falta de infraestructura para drenaje y de mantenimiento a estaciones de bombeo** (IMCO 2023a). (nuestro énfasis)

Todavía sin documentar formalmente, hay impactos sociales, particularmente en el ámbito rural, relacionados con las sequías. Entre estas afectaciones se tienen las migraciones, las fracturas familiares e incluso, tristemente, los suicidios derivados de la falta de agua. El estudio del CENAPRED (2022) documenta las defunciones causadas por los fenómenos naturales, incluyendo los riesgos hidrometeorológicos como las sequías (y claro, también las inundaciones).

7.2.2 Huracanes e inundaciones

La otra cara de la misma moneda climática es la presencia, también recurrente, de los huracanes y las inundaciones que generalmente se generan con su llegada. Este fenómeno suele ocasionar grandes daños a las poblaciones y a las actividades productivas, que terminan por afectar el desarrollo económico regional y en ocasiones, nacional. La estimación de los costos correspondientes es, como ya se refirió, muy complicada, ya que se involucran costos directos e indirectos, tangibles e intangibles (**Arreguín Cortés, 2016a, pp. 6, 8**). Dada la significancia para esta sección, se incluye textualmente la taxonomía de costos que mencionan los autores para los costos directos e indirectos (**Tabla 7.1**).

Efectivamente, hay costos directos muy difíciles de evaluar. Uno de ellos es la pérdida de vidas humanas. Otro de los costos intangibles es la afectación en la salud, con también dificultades para calcularlo. Una metodología establecida para estimar los costos directos es la propuesta por **Parry et al (2009)**. El método consiste en sumar a los costos directos los correspondientes a la reducción de riesgos y mitigación. Es decir, se introduce de entrada un enfoque más proactivo, asociado con la aversión del riesgo y la atención de los daños previsibles.

Estimaciones del CENAPRED, referidas en **Arreguín Cortés et al (2016a, Figura 6, p. 10)**, muestran que durante el periodo 2000-2014 los costos directos de ciclones, tormentas e inundaciones alcanzaron un total de USD\$33,282 millones. El año 2010 fue el de mayor significancia, con un costo estimado de USD\$7,384 millones. En este año, como ya se refirió, ocurrieron los huracanes *Alex*, *Karl* y *Matthew*. En 2013 se tuvo la llegada de los huracanes *Ingrid* y *Manuel*, los que afectaron amplias partes del territorio nacional.

Desde la perspectiva regional el sur sureste sufrió los daños más grandes: Oaxaca, MX\$6,386 millones (o aproximadamente el 47% de las afectaciones por desastres hidrometeorológicos, y que en este caso se explica fundamentalmente por los daños del huracán *Agatha*). Este costo representa tres cuartas partes del total de los daños causados por los ciclones tropicales en México durante 2022. Veracruz y Chiapas ocupan el segundo y tercer lugar en afectaciones hidrometeorológicas, con el 19% y el 17%, respectivamente, ocasionadas por lluvias e inundaciones. Esto significa que 83% de los costos por este tipo de afectaciones se concentraron en solo tres entidades. En el caso de Oaxaca, *Agatha* golpeó principalmente a la vivienda, las comunicaciones y transportes, y el sector agropecuario. Por categoría, los daños se concentraron especialmente en la infraestructura social (Vivienda, educación e **infraestructura hidráulica**⁵) (nuestro énfasis), la infraestructura económica (fundamentalmente comunicaciones y transportes) y los sectores productivos (especialmente el sector agropecuario).

Tabla 7.1 Taxonomía para la estimación de los costos directos e indirectos de las inundaciones.

Costos directos	Costos indirectos
Impactos en zonas urbanas, agrícolas, industriales y comerciales	Actividades de infraestructura.
Medio ambiente	Bienes o servicios afectados, como empleos perdidos de forma temporal o definitiva,
Infraestructura (carreteras, puentes, ferrocarriles, líneas eléctricas, acueductos, carreteras, puentes, ferrocarriles, líneas eléctricas, acueductos, sistemas de distribución de agua potable, y tratamiento de aguas residuales, escuelas, hospitales	Afectaciones a las actividades de las cadenas de producción.
Vida de los habitantes	

Fuente: Elaboración propia con base en Arreguín Cortés et al (2016a, pp. 6-8)

Más recientemente, como ya se señaló antes, el huracán *Otis* azotó a Acapulco en 2023. Ante los impactos tan adversos se tiene una fragilidad institucional y financiera extrema que ya dificultaba enormemente las tareas de reconstrucción (**Triana, 2023**). Sobre esta ya muy difícil situación ocurre el huracán *John* (septiembre de 2024), cuyos impactos adversos en Guerrero y Oaxaca han magnificado todavía más los que tuvo *Otis*. Ahora bien, como ya se mencionó, los huracanes y lluvias extraordinarias son, en los hechos, grandes proveedores de agua.

La construcción de resiliencia a estos fenómenos es muy demandante y costosa, empezando por el conocimiento necesario para entender su ocurrencia, las implicaciones y el diseño de políticas públicas más integradas y robustas. Esto es lo que **Aguilar Barajas et al (2019)** encontraron para Monterrey, al analizar la reconstrucción de la ciudad tras el

⁵ El fenómeno causó daños en la red de suministro de agua potable en diversos municipios. La rehabilitación de la infraestructura duró tres meses. Restablecer el servicio implicó una inversión de MX\$297 millones.

paso del huracán Alex (julio, 2010). Como en el **caso de las sequías**, se tiene una gran exigencia en términos de la calidad del diseño de las políticas públicas. Los recursos financieros requeridos para atender la reconstrucción son muy grandes, frente al actual contexto de debilitamiento institucional y presupuestal de los estados (y especialmente) de los municipios. La construcción de resiliencia es pues muy apremiante para México. En la siguiente sección se detallan un poco más estas cuestiones.

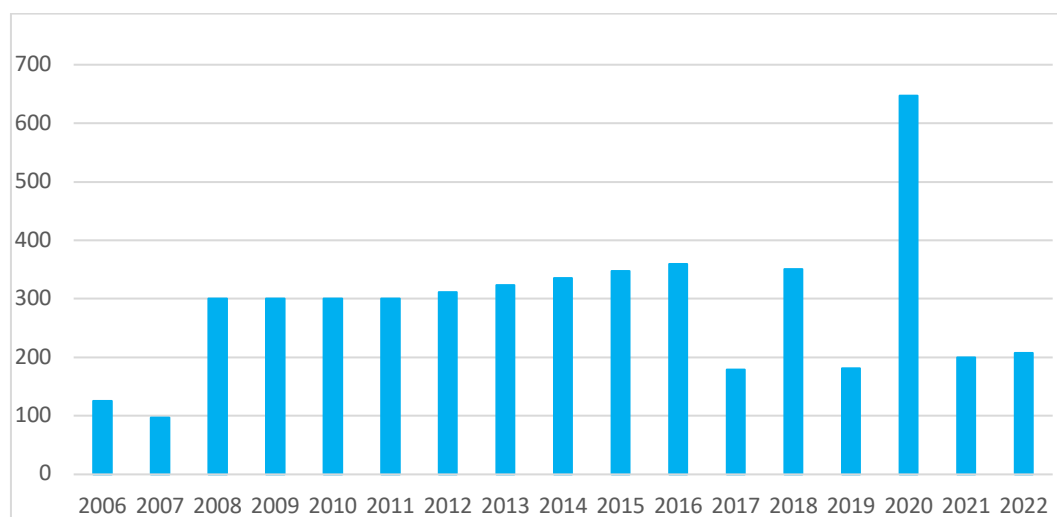
7.3 Construcción de resiliencia a sequías e inundaciones

Construir resiliencia efectiva a sequías e inundaciones pasa por la prevención y la gestión informada de los riesgos involucrados. Existe una profusa literatura internacional sobre los beneficios de invertir en enfoques más proactivos y menos reactivos. Por ejemplo, el Informe de Desarrollo 2014 del Banco Mundial está dedicado a la gestión de riesgos en términos de oportunidades para el desarrollo y dentro de un marco comprensivo (**Banco Mundial, 2013**). En el informe se subraya textualmente que si bien las propias responsabilidades e iniciativas de los individuos son esenciales para manejar riesgos, un entorno social de apoyo es también necesario, especialmente cuando los riesgos son grandes y de naturaleza sistémica. Esto se aplica bien al caso de los riesgos derivados de las sequías e inundaciones.

Frente a este contexto, sorprende que México destine tan pocos recursos para la prevención de desastres. La **Figura 7.1** muestra el monto de los recursos desembolsados por el Fondo para la Prevención de Desastres (FOPREDEN) durante el periodo 2006-2022. Se observa que estos recursos son muy marginales frente a los daños causados por los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Durante este periodo el promedio de recursos asignados fue de MX\$286 millones. El monto más alto corresponde a 2020, con MX\$647 millones. En 2022, los recursos destinados a la prevención por el FOPREDEN fueron de tan solo MX\$208 millones.

En contraste, los eventos registrados entre 2010 y 2022 en promedio han causado daños por MX\$1,700 millones, habiendo fenómenos con afectaciones por encima de los MX\$23 mil millones en Baja California Sur (*Odile*, 2014), Guerrero (*Manuel e Ingrid*, 2013) (**Moody's, 2024**). Los daños cuantificados para el Huracán *Alex* (julio de 2010 en Nuevo León), fueron del orden de los MX\$21 mil millones (**Mendoza Tinoco et al, 2019; Moody's, 2024**). En 2024 se tienen los casos de la tormenta *Alberto* en Nuevo León y de *John* en Oaxaca y Guerrero, cuyas afectaciones han sido muy cuantiosas. En el segundo caso, lo más lamentable es la pérdida de vidas, muchas de las cuales se podrían haber evitado.

Figura 7.1. Recursos asignados por el FOPREDEN, 2006-2022
(millones de pesos corrientes)



Fuente: Elaboración propia con datos de CENAPRED (2022, Figura 1.13, p. 22), tomados del Presupuesto de Egresos de la Federación de cada año.

En este contexto, hacen mucho sentido las recomendaciones de política pública del **CENAPRED (2022)** para el estado de Oaxaca (tras el paso del huracán *Agatha*) y que bien se pueden aplicar a todo México. Entre las diferentes recomendaciones se incluyen varias muy relevantes a la luz de la discusión sobre las escasas aportaciones de los estados a sus propios fondos de desastres. Se recomienda que los estados tengan una protección financiera más sólida para la atención de los fenómenos. Siguiendo los lineamientos por fases ya referidos, el CENAPRED propone recomendaciones, derivadas del Índice de Gobernabilidad y Políticas Públicas (IGOPP), que coinciden con el espíritu de la Ley de Disciplina Financiera, ya mencionada, en el sentido de que los estados están mandados a aportar más recursos a sus propios fondos de desastres. Especial consideración se debe dar a la **infraestructura crítica**. (nuestro énfasis).

De hecho, a la luz de tan escasos recursos para la prevención y las graves afectaciones que se sufren ante la llegada de los desastres naturales, especialmente en los estados y estratos más vulnerables, parecería correcto expresar que México incumple su propia Ley General de Protección Civil. Esta Ley establece, en su artículo 10, las siete fases anticipadas a un fenómeno perturbador.⁶ El seguimiento puntual de estas fases exige muy altas competencias de comprensión de los fenómenos, de los riesgos y sus escenarios, de sus posibles efectos y acciones para la prevención y mitigación de estos riesgos, y de la

⁶ Ley General de Protección Civil, publicada en el Diario Oficial de la Federación, el 6 de junio de 2012. Su última reforma es del 20 de mayo de 2021. Expresadas textualmente, las fases indicadas en el artículo 10 de esta Ley son las siguientes (**CENAPRED, 2022**): (I) Conocimiento del origen y naturaleza de los riesgos, además de los procesos de construcción social de los mismos; (II) Identificación de peligros, vulnerabilidades y riesgos, así como sus escenarios; (III) Análisis y evaluación de los posibles efectos; (IV) Revisión de controles para la mitigación del impacto; (V) Acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de riesgos; (VI) Desarrollo de una mayor comprensión y concientización de los riesgos; y (VII) Fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad.

construcción de resiliencia social. Estas tareas hacen sentido, pero no parecen reflejarse bien a bien en las políticas públicas conducentes (**Aguilar Barajas et al, 2019**)

También se han venido documentando y publicando experiencias sobre la conveniencia de diseñar políticas públicas más orientadas a la prevención y menos a la reacción. Como textualmente se apunta en **Arreguín Cortés et al (2016b)**, debe haber un cambio de paradigma frente a las emergencias, “hacia un modelo preventivo orientado a la gestión del riesgo” (p. 63). Si bien lo anterior se refiere a las sequías, bien puede también aplicarse a las inundaciones. De hecho, en esta publicación se menciona que en los años que se diseñó y operó el Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE), que se aborda más adelante en esta misma sección, también se creó la Comisión Intersecretarial para la Atención de Sequías e Inundaciones. Sin embargo, hace ya casi 10 años se argumentaba que el camino hacia un modelo proactivo de gestión de sequías era muy lento y largo (**Aguilar Barajas et al 2016**). Esto se ha confirmado con la continuación de la sequía de los últimos años. Pese a la gravedad de la situación, no ha habido planes lo suficientemente robustos a ningún nivel de la estructura institucional (local, estatal o federal) para abordar este fenómeno, el cual es recurrente.

Los esfuerzos más comprensivos para atender estos fenómenos hidrometeorológicos extremos se fueron diluyendo o desapareciendo. Un ejemplo es la eliminación en 2021 del FONDEN (aunque ya desde 2020 el presidente de la República había instruido a la mayoría legislativa su desaparición) (**Triana, 2023**).⁷ El FONDEN se estableció en 1999 como un fondo revolvente para atender los daños de los desastres naturales imprevistos. El Fondo tenía la enorme ventaja de no depender de las asignaciones anuales del Presupuesto de Egresos de la Federación. De acuerdo con este autor, antes de desaparecer el Fondo acumulaba más de MX\$35 mil millones.

Otro ejemplo del debilitamiento institucional lo da el Programa Nacional contra la Sequía (PRONACOSE). Este programa se estableció en 2013 como parte de los aprendizajes de la sequía de 2010-2012, y que tuvo una expresión más visible en los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía (PMPMS) (**CONAGUA, 2014**), elaborados por cada Organismo de Cuenca.⁸ Una discusión analítica del Programa y del marco institucional y normativo para las sequías se encuentra en **Arreguín Cortés et al (2016b)**.

En síntesis, la apropiada atención a fenómenos hidrometeorológicos extremos requiere de enfoques más preventivos, los cuales demandan infraestructura más resiliente tanto a sequías como a inundaciones. Los mismos fenómenos hacen más vulnerables las reservas de infraestructura. En este sentido, las presiones por infraestructura más resiliente son muy grandes; las distintas infraestructuras deberán estar en funcionamiento nuevamente en los tiempos más cortos posibles, para no dañar en demasía a las poblaciones y a las actividades económicas. Esto coincide con el cambio de paradigma que se propone, en el sentido de favorecer el financiamiento anticipado para la resiliencia (**OECD, 2019**), como parte del

⁷ Según este autor, no solo se eliminó este fideicomiso, sino que además se modificó la Ley Federal de Presupuesto y Responsabilidad Hacendaria, desapareciendo la obligación de asignar un mínimo de 0.4% del Presupuesto de Egresos de la Federación (PEF) para la atención de desastres naturales.

⁸ Una discusión analítica del Programa y del marco institucional y normativo para las sequías se encuentra en **Arreguín Cortés et al (2016b)**.

cambio de pensamiento: de protección de activos a resiliencia sistémica. Es claro que, en este contexto y sus exigencias, no ayuda tener infraestructura hidráulica que envejece. Más aún, no saber que esto ocurre ni a que ritmo amplía la escala y los impactos de los riesgos al operar infraestructura que ha rebasado su vida útil y a la que no se le brinda mantenimiento adecuado o este es inexistente. Los recursos financieros constituyen claramente una seria limitante en este sentido.

De todo lo anterior se desprende que efectivamente los riesgos climáticos mantienen una fuerte incidencia en la infraestructura hidráulica. Es decir, se tiene la necesidad de construir, operar y mantener infraestructura resiliente al clima. Esta exigencia es particularmente relevante ante amplios sistemas de infraestructura que están envejeciendo. Como lo argumenta **Ganguly et al (2021)**, resulta de especial relevancia abordar la resiliencia de la infraestructura crítica ante los extremos climáticos. A estas cuestiones se les dedica más atención en el siguiente apartado.

7.3.1 Infraestructura resiliente a riesgos climáticos

Las sequías y el aumento poblacional demandan más inversiones en proyectos de infraestructura de almacenamiento, conducción, potabilización, distribución y tratamiento de agua. Esta necesidad de inversión también la plantean los retos del cambio climático (**OECD, 2024d**) ya que, por ejemplo, el efecto de la evaporación por aumento de la temperatura se vuelve un factor crítico para el nivel de almacenamiento en las presas (**IMCO, 2023a**).

Ante la gravedad de los impactos derivados de las sequías, México necesita fortalecer su marco institucional para enfrentarlos. En su oportunidad, la creación del PRONACOSE se convirtió en un espacio de acción de políticas públicas que ayudaron a entender de mejor forma el fenómeno y a diseñar estrategias de acción. Es en este marco que se crearon, como ya se mencionó, los Programas de Medidas Preventivas y de Mitigación a la Sequía (PMPMS). Estos programas deberían restablecerse y actualizarse, incluyendo su marco regulatorio (**IMCO, 2023a**).

Conocer la edad de la infraestructura resulta indispensable para gestionarla de mejor forma ante las sequías e inundaciones. Por ejemplo, en el marco de la sequía que afectó a Nuevo León entre 2019 y 2022, en 2022 se ocasionaron recortes en el suministro de agua a Monterrey y su área metropolitana. Para agravar la situación, en junio de ese año se presentó una falla en el acueducto que transporta el agua de la Presa El Cuchillo – localizada a cerca de 100 km de Monterrey. Por varios días, esta situación puso en jaque el abastecimiento, al reducir el suministro total de 16 a casi 8 m³/s. En este caso, se trata de un acueducto de más de 30 años según el cual, de acuerdo con lo analizado al respecto, ha tenido un mantenimiento limitado.

En este sentido, México ha construido obras de protección a inundaciones, como presas relativamente grandes, pequeñas presas y bordos. Los resultados de estas obras han sido muy benéficos. Los daños que recurrentemente ocurren en el país debido a estos

fenómenos serían mayores sin estas obras. Por supuesto que hay grandes y urgentes asignaturas pendientes para crear resiliencia a estos eventos y minimizar las consecuencias. El caso Monterrey ilustra las ventajas de invertir en esta infraestructura de prevención, con el caso de la *Presa Rompepicos*, construida entre 2002 y 2003 sobre la parte media alta de la cuenca del río Santa Catarina (**Aguilar y Ramírez, 2021**), cuando aún estaba todavía presente entre varios segmentos de la población la memoria de los daños causados por el huracán Gilberto (1988)

En este contexto, vale la pena mencionar que los daños de las inundaciones tienen una alta correlación con los cambios en los usos del suelo de las ciudades y sus áreas circundantes. La urbanización ha venido ganando terreno a áreas boscosas y de infiltración que no solo facilitan la recarga de acuíferos, sino que también reducen los flujos de agua a ríos urbanos. En los casos de pendientes pronunciadas, la impermeabilización del suelo, causada por la creciente urbanización, genera lo que se llama *avenidas rápidas*, cuyo manejo es más complicado que en el caso de crecientes más transitables. Esto es lo que ocurre en el Área Metropolitana de Monterrey (**Sisto y Ramírez-Orozco, 2018**). Como se argumentó en los capítulos 1 y 2, la buena gestión del agua urbana requiere de un enfoque sistémico para analizar, diseñar y planear su infraestructura (**Karamouz, 2022**).

7.3.2 Limitaciones financieras

Se ha venido insistiendo que, en general, el país tiene recursos financieros muy limitados para enfrentar los daños de los huracanes en la población y en las actividades económicas, especialmente los costos asociados con la reconstrucción de infraestructura. Esta situación se vive más severamente en los estados y municipios más pobres, los cuales tienen estructuralmente una mayor debilidad financiera. Los casos del sur sureste lo muestran con toda claridad. Los estados no cuentan con recursos propios para cubrir los daños; los apoyos federales son insuficientes, especialmente en eventos de gran magnitud.

Los impactos en las finanzas públicas de estados y municipios tales como las presiones en el gasto y en la liquidez pueden persistir varios años después de la ocurrencia de los huracanes. Esto es lo que encuentra la firma Moody's en los estados que califica (**Moody's, 2024**). Es entonces entendible que **la reconstrucción de infraestructura puede ser muy lenta**. Es también claro, como bien lo apunta Triana (2023), que *la planificación y la previsión son esenciales en la gestión gubernamental y que las decisiones derivadas de la improvisación siempre terminan mal*.

De acuerdo con la Ley de Disciplina Financiera de las Entidades Federativas y Municipios, las entidades deberían constituir fideicomisos públicos con fondeo anual para enfrentar los desastres naturales. La calificadora Moody's encuentra que los estados han hecho muy poco en este sentido. Sus estimaciones muestran que, en promedio, los estados tienen reservas de MX\$78 millones, lo cual es inferior al 1% de sus ingresos operativos (**Moody's, 2024**). Lo anterior contrasta con que, también en promedio, los eventos registrados entre 2010 y 2022 han causado daños por MX\$1,700 millones, habiendo fenómenos con

afectaciones por encima de los MX\$23 mil millones en Baja California Sur (*Odile*, 2014), Guerrero (*Manuel e Ingrid*, 2013) y Nuevo León (*Alex*, 2010) (**Tabla 7.2**).

Si bien el análisis de Moody's solo aplica a los estados calificados por esta empresa, si muestra un patrón nacional caracterizado por recursos muy limitados para atender los desastres naturales. Además, muy pocas entidades tienen seguros contra desastres de este tipo. En general, los estados más propensos a sufrir estos fenómenos son también aquellos de menor desarrollo relativo, como Oaxaca y Guerrero (**CENAPRED, 2022**). Los efectos de *Otis*, uno de los 10 eventos más catastróficos en el sector asegurador, se sentirán por muchos años (**El Economista, 29 de octubre, 2023**). Esta vulnerabilidad de los estados y sus localidades más rezagadas en su desarrollo económico se reconoce bien en el estudio 2022 del CENAPRED. Estos espacios carecen de las condiciones adecuadas para enfrentar las contingencias, y quedan más expuestas a los riesgos y peligros de los desastres. El estado de Oaxaca ejemplifica muy crudamente estas condiciones de pobreza y vulnerabilidad, al estar en los primeros planos del rezago social en México.

La **Tabla 7.2** muestra, en su última columna, la proporción de los fondos de desastres 2022 en relación con el monto del daño provocado por el huracán de referencia. En general, se observan proporciones muy bajas. Llama la atención el caso de Nuevo León, pues este porcentaje no llegaba ni siquiera al 0.1 por ciento. Le siguió Guerrero con el 0.5 por ciento. Las reservas de Nuevo León fueron apenas de 12 millones de pesos, frente a un daño derivado del huracán Alex, estimado en 21 mil millones (**Mendoza Tinoco et al, 2019; Moody's 2024**). Lo que sorprende es que el fondo de Nuevo León estaba muy por debajo de estados con menor desarrollo relativo, como Guerrero cuyo fondo de 226 millones, si bien todavía muy bajo, era casi 19 veces más grande. Los casos con porcentajes más elevados – como Chiapas, Puebla y Sonora – se refieren a estados con daños más pequeños.

En este contexto, llama la atención que el 24 de septiembre de 2024, el Consejo Nuevo León, organizara el seminario *Gobernanza de riesgos críticos. Una aproximación a los requerimientos financieros para atender riesgos hídricos en Nuevo León*. Este evento contó con la participación de especialistas de la OCDE y de la sociedad civil local. Una premisa de partida fue que ante la severidad y magnitud de los riesgos involucrados, el estado debería contar con el financiamiento adecuado. Desafortunadamente a esta iniciativa que en el papel lucía muy bien, en la práctica quedó diluida si no es que desaparecida.

Por lo tanto, la reconstrucción de la infraestructura dañada por los huracanes se convierte en un problema mayúsculo para las finanzas públicas de los estados afectados (**Moody's, 2024**). Es difícil contar con liquidez para enfrentar los daños inmediatos en la población y las actividades económicas, por lo que se tiende a contratar créditos de corto plazo. También se contratan créditos de largo plazo para la reconstrucción de infraestructura, complementados por los apoyos (generalmente muy limitados) del gobierno federal. En general, los estados y municipios tienen que enfrentar solos los costos de la reconstrucción. En lugar del FONDEN se estableció un Programa Presupuestal de Desastres Naturales, administrado directamente por la Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP). Se estima que en octubre de 2023 este Programa disponía de 18 mil millones de pesos, aunque

para el presupuesto de 2024 sufriría un recorte de 3 mil 500 millones (**Triana, 2023**). Por lo ya expuesto, el monto de estos recursos está muy por debajo de las necesidades.

Tabla 7.2 Fondos de desastres 2022 de los estados calificados expuestos a huracanes respecto al mayor daño registrado entre 2010 y 2022.

Estado	Fondos de desastres en 2022 (mdp)	Monto del daño más elevado provocado por huracán (mdp, año)	Fondos de desastres en relación con el monto del daño (en %)
Oaxaca	226	6,385 (2022)	3.54
Veracruz	225	3,557 (2021)	6.33
Chiapas	190	532 (2012)	35.71
Puebla	139	881 (2021)	15.78
Guerrero	125	23,441 (2013)	0.53
Sonora	22	163 (2016)	13.50
Sinaloa	22	3,048 (2013)	0.72
Hidalgo	15	1,357 (2013)	1.11
Nuevo León	12	21,500 (2010)	0.06
Nayarit	nd	1,986 (2018)	nd

Nota: Daños estimados corresponden al sector público y privado. Datos proporcionados por los estados calificados. La última columna es de elaboración propia con base en la fuente consultada.

mdp significa millones de pesos

Fuente: Moody's (2024, Tabla1) con datos del CENAPRED.

7.4 Experiencias del caso Monterrey

Dada la contribución de Nuevo León y de esta metrópoli a la economía nacional, la exposición tanto a sequías como a inundaciones tiene implicaciones nacionales. El propio contexto geohidrológico climático de la ciudad, en una región semi-árida y de, en la ausencia de huracanes y lluvias extraordinarias, escasa precipitación, implica largos periodos de sequía. La sequía de mediados de los 1950s tuvo una duración de alrededor de 75 meses. También se tuvo la sequía de mediados de los 1990s, y la de 2011-2013. Ésta última fue tan sólo de 26 meses, pero fue la segunda más fuerte en la historia reciente. Esta sequía fue venturosamente interrumpida por el huracán *Ingrid* a mediados de septiembre de 2013. Casi 10 años después, la tormenta *Alberto*, como ya se ha referido, vino a rescatar al área metropolitana de una severa sequía que disminuyó a niveles alarmantes el almacenamiento en dos de las tres presas que abastecen a la metrópoli. De hecho, estos niveles eran más críticos que los existentes en marzo de 2022, cuando Monterrey se convirtió en noticia nacional e internacional (referida en medios como *The Washington Post*, *The New York Times*, *El País*, *CNN*, *DW*, *BBC*, y *Bloomberg*, entre otros)

Lo anterior introduce a escena el papel de los huracanes y su doble papel en la vida de la ciudad. En la historia reciente, la llegada de los huracanes Alex (2010), Ingrid (2013), Hannah (2020) y la tormenta *Alberto* (2024), afectaron el funcionamiento metropolitano y, más particularmente, dañaron las avenidas Constitución y Morones Prieto. Estas avenidas son críticas para la funcionalidad metropolitana. Por otra parte, estos fenómenos, como bien se apunta al principio de este capítulo, también proporcionan grandes volúmenes de agua. El funcionamiento de la ciudad y su sistema de suministro han convivido en este ciclo de sequía-tormenta-sequía. La historia de Monterrey conviviendo en estos dos extremos climáticos se encuentra referida en **Aguilar y Ramírez (2021)**.

Todavía se tienen memorias del Huracán *Alex* (2010), varios de cuyos daños no se han terminado de arreglar. Si bien, los costos totales del *Alex* en Nuevo León se estiman en alrededor de los MX\$21 mil millones de pesos, añadiendo los estados de Tamaulipas y Coahuila los costos se elevan a MX\$25 mil millones (**CENAPRED, 2014**). Para agravar la situación actual, ya no existe el FONDEN el cual fue muy importante para financiar la reconstrucción tras el *Alex*. Actualmente el estado de Nuevo León se encuentra en una situación de endeudamiento muy delicada, y tuvo que solicitar apoyo al gobierno federal para enfrentar los daños derivados de este evento. Los recursos proporcionados, en realidad fueron aportaciones; es decir son fondos correspondientes a Nuevo León de las participaciones federales.⁹

La *presa rompepicos*, que desde 2003 ha protegido la ciudad de las inundaciones, se puso a prueba en julio de 2005, con la llegada del Huracán *Emily*. De no haber sido por ella, el Huracán *Alex* (julio, 2010) habría inundado parte del centro de la ciudad. Curiosamente, para cuando llegó este huracán, la ciudad tenía sus presas con altos niveles de almacenamiento; de tal forma que el evento causó serios daños a la infraestructura y funcionalidad metropolitana, pero contribuyó muy limitadamente al llenado de las presas. Lo anterior confirma lo mencionado anteriormente en torno a la *suerte climática*, y a la necesidad de entender estos fenómenos – sequías e inundaciones – como parte de **un solo sistema** geohidrológico-climático, actuando sobre, a su vez, sistemas urbano-regionales. Es decir, entender y abordar en políticas públicas los impactos de sequías e inundaciones requiere de un enfoque sistémico, en el que la prevención y la gestión del riesgo son elementos centrales. Es en este marco tan complejo en el que se ubica la relevancia de la infraestructura hidráulica en su relación con estos fenómenos climáticos.

7.5 Comentarios concluyentes

Si se entiende que los eventos son naturales, pero no así los desastres (**Zurich, 2019**), entonces hay un mucho de trabajo para gestionar y diseñar infraestructura resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos. La prevención debería estar, entonces, en el centro de este diseño, lo cual impacta favorablemente el crecimiento y desarrollo

⁹ Véase *El Norte*, 19.10.2024.

económicos. Las inversiones realizadas como parte de una planeación proactiva tienen rendimientos netos positivos. Esto conduce a la adecuada gestión del riesgo, lo cual se hace especialmente visible en el caso de la infraestructura crítica y sus conexiones con otras infraestructuras. En este sentido también se expresa la OCDE (2024b), en su compendio de buenas prácticas internacionales sobre **la calidad de la infraestructura** (nuestro énfasis). Quizás el mensaje más importante es que la construcción de resiliencia a desastres naturales requiere de una valoración muy cuidadosa de los riesgos y las vulnerabilidades al operar infraestructura que envejece.

Los riesgos e impactos de la inacción o de medidas insuficientes y tardías son muy grandes. Políticas más informadas, menos fragmentadas y cortoplacistas, son necesarias para la construcción de resiliencia a estos fenómenos. Como bien lo expresan **Swuatuk y Wirkus (2018)**, en su libro sobre agua y cambio climático, hay un efecto *boomerang* y consecuencias no intencionales que afectan la inseguridad del recurso. En este sentido, los autores enfatizan que los problemas del mañana se tienen que resolver ahora, desde enfoques más integrados e interdisciplinarios, considerando desde el principio las cuestiones económicas, sociales (incluyendo la equidad) y políticas.

El caso Monterrey ejemplifica el gran reto que enfrentan varias regiones del país, incluyendo también a la Ciudad de México: aprender a convivir en un entorno climáticos de extremos - sequías e inundaciones. Vale la pena subrayar que estos dos extremos son en realidad parte de un solo sistema hidrológico, climático, cuyo entendimiento es absolutamente necesario para el diseño de políticas públicas más informadas, contextuales, en torno a la gestión del agua en general y de la infraestructura en particular. *Políticas por diseño* es el gran mensaje del texto clásico de **Bobrow y Dryzek (1987)**, y de las lecciones aprendidas tras la reconstrucción del huracán Sandy en Nueva York/Nueva Jersey (**Ovink y Boeijenga, 2018**), que bien pueden considerarse como gran marco para la gestión del agua en general y de la infraestructura en su relación con los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

8

Conclusiones, Recomendaciones y Aportaciones del Proyecto

En este capítulo final se presentan las principales conclusiones y se derivan recomendaciones y orientaciones de política pública sobre el envejecimiento/obsolescencia de la infraestructura hidráulica en México. Dada la transversalidad y multidimensionalidad del tema, la traducción de problemas en políticas públicas *por diseño* requiere necesariamente de perspectivas integradas, multidimensionales, más informadas, más proactivas. No es benéfico para el país continuar con un modelo de gestión insostenible de su infraestructura hidráulica que envejece cuyo costo de oportunidad se expresa no solo en términos económico-financieros sino también en vidas y en tiempo – lo cual no se puede recuperar. Hacia el final se presenta una relación de los principales impactos actuales y potenciales de este proyecto de investigación, entre los cuales se tiene la relación establecida con el INEGI y la conferencia internacional llevada a cabo el 20 de noviembre de 2025. Este capítulo se enriquece con literatura nacional e internacional, específicamente pensada para apoyar varios de los planteamientos.

8.1 Conclusiones

8.1.1 Relevancia y necesidad de esta investigación

Para este proyecto de investigación es muy importante el reconocimiento de que la infraestructura hidráulica es esencial para el desarrollo y que su inadecuada provisión tiene un impacto negativo en la economía y la sociedad. Esto permite entender que la calidad de su disponibilidad se traduce en servicios de agua y saneamiento también de calidad. En

esta lógica, la desatención a su envejecimiento y deterioro afecta negativamente a las poblaciones y las actividades económicas. Como se demostró en el capítulo introductorio, este tema está sub estudiado en México. A ello se abocó este proyecto, cofinanciado entre el Tecnológico de Monterrey y la Fundación Gonzalo Río Arronte.

Como se desprende del análisis de la literatura, una buena gestión de la infraestructura, **el papel de la información, de los datos, de la medición, son esenciales**. Esta es una premisa de partida fundamental para la realización de esta investigación sobre el envejecimiento de la infraestructura hidráulica. De aquí se desprende la urgencia de documentar el estado de esta infraestructura, de su edad de servicio en relación con su vida útil de diseño. Relacionado con este punto, también merece atención el tema de la conservación y modernización. Tener en operación infraestructura de buena calidad hace más eficiente la prestación de sus servicios y reduce los costos de facturas futuras.

En relación con el invaluable papel de la información, en esta investigación se confirma que se tienen alcances y limitaciones en torno a las fuentes y datos sobre el envejecimiento de la infraestructura. El país ha realizado grandes esfuerzos sobre la información de sus sistemas hídricos. Hay información valiosa en los portales públicos sobre diferentes temas, entre ellos la infraestructura hidráulica. La Comisión Nacional del Agua tiene publicaciones de referencia como *Estadísticas del Agua en México* y la *Situación del Subsector Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento*. El INEGI también proporciona en sus diferentes subsistemas de información datos que enriquecen el conocimiento sobre agua en México, aunque menos en lo referente a la calidad de la infraestructura hidráulica.

Desafortunadamente, la disponibilidad pública de esta información es limitada y en general es de muy difícil acceso y recopilación. Los portales que albergan parte de esta información tienden a ser *poco amigables*, lo cual dificulta aún más el proceso de consulta y obtención de los datos que se buscan. Aquí reside una gran área de oportunidad para, especialmente en el caso de CONAGUA, hacer que esta búsqueda sea más sencilla para el público interesado en estos temas. En varias circunstancias se requiere de conocimiento especializado para acceder a los datos. Esto significa que no todas las personas pueden hacerse de información sobre la edad y el estado general de la infraestructura.

La revisión de la literatura también fue muy importante para la construcción de un marco analítico en torno a los principales asuntos asociados con el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y las métricas relacionadas. Esta revisión ayudó a orientar el diseño metodológico de esta investigación. La expresión más directa se refleja en los capítulos 4 y 5, donde se calculó el **factor de envejecimiento** de sistemas de infraestructura seleccionados, tanto en la escala nacional como de las tres grandes metrópolis del país. Se sabe, sin embargo, que este indicador se tiene que analizar en contexto.

Tanto la edad de servicio como la vida útil, variables con las que se construye el indicador, son de carácter multifactorial. En este sentido, si bien el envejecimiento de la infraestructura puede conducir a problemas en su funcionamiento, la edad no es la única variable. Los conceptos de fin de vida útil funcional y técnica ilustran muy bien lo anterior. La infraestructura hidráulica es muy heterogénea; hay profundas diferencias entre subsistemas y componentes, además de condiciones actuando sobre ellos. Cada proyecto es distinto.

Habiendo hecho estas consideraciones, también se reconoce que la mayoría de los enfoques y modelos sobre el tema – de los más sencillos a los más sofisticados - requieren **la edad** como variable esencial. En este sentido, se confirma lo atinado que fue seleccionar el tema del envejecimiento de la infraestructura para llevar a cabo esta investigación. Esto es congruente con las orientaciones de la IWA sobre los requisitos asociados con un buen indicador. Avanzar a modelos y métricas más comprensivas requiere de información que el país no tiene o se publica de manera incompleta.

Los resultados encontrados en la investigación se podrían resumir en la siguiente expresión: **“México: Infraestructura que envejece, insuficiencia de datos y de recursos”** Esta gran conclusión, ante la significancia de la infraestructura hidráulica para el país, conlleva grandes retos y riesgos para la sostenibilidad de la infraestructura y de los servicios que ofrece. La literatura nacional e internacional es clara en señalar que al operar infraestructura más allá de su ciclo de vida, genera ineficiencias y, al final del día, más costos que si se instrumentara *ex ante* un programa de conservación, como parte central de su diseño. El mal funcionamiento de la infraestructura va a afectar en cascada a otras infraestructuras. Nuestros resultados apuntan a una infraestructura que envejece o que ha rebasado ya significativamente su vida útil. El caso de las presas y las estaciones climatológicas e hidrométricas así lo muestran.

En este contexto, la gestión de la infraestructura hidráulica debería representar un asunto de interés nacional, aunque esto no parece que se considere así en la práctica. La continuada caída en los presupuestos, se vale subrayar, así lo estarían indicando. Abordar brechas financieras entre las necesidades y la disponibilidad de recursos es un tema de la mayor trascendencia para el país. Seguir operando infraestructura más allá de su vida útil constituye un riesgo cuya desatención puede ser incluso más costosa que la atención más oportuna de los requerimientos para su mantenimiento, rehabilitación o reemplazo.

8.1.2 Envejecimiento de la infraestructura hidráulica

Escala nacional

El problema del envejecimiento de la infraestructura hidráulica a nivel nacional se centra en las presas en primer lugar y en las redes de medición climatológica e hidrométrica en un segundo término. Los acueductos se enfilan ya, en lo general, hacia el fin de su vida útil, por lo cual en poco tiempo serán también motivo de preocupación. Finalmente, las plantas tanto potabilizadoras como de tratamiento son las estructuras de menor preocupación en el contexto actual, aunque esto no significa la ausencia de problemas. Son muy conocidos los casos de plantas de tratamiento o que no operan bien, ante la falta de recursos. Si bien no se cuenta con información actualizada y verificada, es de suponer que en general la infraestructura recibe un mantenimiento muy limitado, por lo que es de esperar que las necesidades de rehabilitación y reemplazo son grandes.

La edad promedio de las 208 presas principales en México es de 67.3 años, claramente superando el umbral de la vida útil. De éstas, el 68.3%, o sea, más de dos terceras partes del total, han superado ya su vida útil y continúan en operación. En 107 presas no hay datos de que haya habido alguna actividad de conservación de la infraestructura. En los

últimos 20 años solo aparecen registros de reparaciones para 30 presas. La edad promedio de los principales acueductos es de 34 años. Si bien lo anterior indica que no se ha alcanzado el umbral de vida útil (estimada, en general en 40 años), el 40% de esos sistemas ya la han superado. Esto representa un foco rojo ante la crucial función que cumplen de llevar agua a las ciudades.

En todo este contexto, no solo se trata del envejecimiento de la infraestructura, también preocupa que el país ha ido perdiendo capacidades de medición y de mantenimiento. La red climatológica actual tiene un nivel de medición (en número de estaciones) similar al que se tenía a mediados de la década de los 1950s. Esto implica que en México se dispone de una red climatológica convencional similar a la de hace 75 años. De la misma manera, el nivel de medición en hidrometría se asemeja al que se tenía a mediados de los 1950s. A la fecha de integración de este reporte fue difícil encontrar una base de datos pública, completa y unificada sobre la fecha de construcción o la fecha de inicio de operaciones tanto de las plantas potabilizadoras como de las de Tratamiento de Aguas Residuales en México, a partir de la cual se pudiera determinar las edades. Sin duda, esto representa una asignatura pendiente para investigar.

Escala metropolitana (Ciudad de México, Monterrey y Guadalajara)

Como se menciona en la introducción de este informe, se tuvieron varias razones para que esta investigación se centrara en las tres principales metrópolis. Prácticamente no existen estudios comparativos. Por separado sí se cuenta con trabajos y publicaciones sobre ellas, aunque domina la Ciudad de México. Hay un déficit sobre Monterrey y Guadalajara. Esta ausencia de investigación es más marcada todavía en el tema objeto de este proyecto. Una razón de peso es que estas metrópolis son motores del crecimiento y desarrollo nacional, de tal forma que el envejecimiento de su infraestructura hidráulica es una cuestión de interés nacional. Los hallazgos que se presentan fueron posibles gracias al generoso apoyo de los tres organismos (SEGIAGUA, SADM y SIAPA), tanto en reuniones presenciales como en la asistencia a la conferencia internacional del 20 de noviembre de 2025, en la cual compartieron conocimiento muy valiosos.

Los factores de envejecimiento medios de las tres metrópolis (CDMX, MTY y GDL) evidencian un mayor problema en CDMX seguido de Área Metropolitana de Monterrey y posteriormente por Guadalajara. Aunque, al realizar la comparación por subsistema se pueden apreciar dinámicas distintas. En cuanto a presas, fuentes de abastecimiento y plantas de tratamiento la mayor edad está en CDMX, luego siguen Monterrey y Guadalajara. Para acueductos y red de alcantarillado, la infraestructura más vieja se encuentra en CDMX seguido de Guadalajara. En la red de agua potable es Guadalajara la que presenta el mayor problema, y después Monterrey. Finalmente, en cuanto a plantas potabilizadoras, Monterrey tiene la infraestructura más avejentada. Es importante mencionar que en el caso de las redes tanto de distribución de agua potable como de alcantarillado, el valor promedio no es representativo de la problemática existente en los cascos centrales de las ciudades, puesto que está altamente influenciado por las redes relativamente nuevas construidas en las zonas de reciente urbanización. En forma local, la problemática puede cambiar en sus prioridades. Esto conduce al complejo mosaico de gobernanza metropolitana que incluye

distintas escalas espaciales, jurisdiccionales y niveles de decisión, que van de lo federal a lo local.

Considerando las tres metrópolis en conjunto y el tipo de obra, en promedio, los acueductos y las plantas potabilizadoras han superado ya su vida útil mientras las presas y las redes de alcantarillado están cerca de hacerlo. Las plantas de tratamiento y las redes de distribución de agua potable son los elementos que presentan factores de envejecimiento menores. En esta narrativa nuevamente conviene recordar que los resultados promedio están influenciados por el crecimiento de las metrópolis. Independientemente de los resultados particulares, la información indica que el envejecimiento de las distintas infraestructuras urbanas en las tres más importantes metrópolis del país es un tema de gran interés que debe abordarse con la mayor seriedad posible. Se trata de una cuestión de interés nacional.

8.1.3 Importancia del mantenimiento

Tanto en la escala nacional como en la metropolitana, el tema del mantenimiento de la infraestructura hidráulica es crucial. Se sabe de la experiencia nacional e internacional que la operación y **el mantenimiento** desempeñan un papel clave para asegurar el desempeño sostenible de cualquier sistema. En varios países, como Japón, la planeación y operación de la infraestructura hidráulica incluye sistemas de gestión del mantenimiento. Todo esto indica la necesidad de contar con un diseño, modelaje y programación muy cuidadosa del mantenimiento, rehabilitación y reemplazo de la infraestructura hidráulica. En el caso de México, por lo menos desde hace 30 años se ha venido insistiendo en la necesidad considerar esta importante cuestión desde la perspectiva más comprensiva de la conservación, no solo el mantenimiento, de la infraestructura (**Sancho y Cervera, 1995; Martínez Pérez, 2014; Fernández et al, 2023; Robledo Cabello, 2023; Comité Técnico de Agua – CICM, 2024**). Vale la pena recalcar que el editorial de la revista Ingeniería Civil de abril de 1995 se lo dedicaba precisamente a la *Cultura de la Conservación* (su énfasis) (**CICM, 1995**)

Esto significa, por ejemplo, que los costos de operación y mantenimiento son considerados desde un principio como parte del diseño inicial. El principal impacto de realizar inversiones adecuadas en mantenimiento de infraestructura se expresa en una mayor calidad de los servicios de agua y saneamiento, lo que, a su vez, incide favorablemente en el bienestar social, en las actividades productivas, y en la calidad ambiental. Sin embargo, está la latente inclinación a asumir que, si no hay problemas inmediatos, no hay necesidad de estas tareas. Un enfoque proactivo, se traduce en menores interrupciones de los servicios y afectaciones a otros sectores, en lo que se conoce como *el efecto cascada*. Como se documenta en la literatura y evidencia empírica, en su sentido comprensivo el mantenimiento es un tema de seguridad.

En las redes de distribución, **las fugas son un indicador claro del deterioro de la infraestructura**. La desatención de las fugas impone presiones adicionales sobre la oferta. Abordar y gestionar el agua no contabilizada (ANC) y las fugas es indispensable para una mejor gestión de un sistema de agua (**Fernández Esparza y Ochoa Alejo, 2014; IWA, 2020**). Su costo se extiende más allá de la sostenibilidad financiera y operativa de los

organismos de agua. Incluye además los impactos sobre la población, las actividades económicas, y el ambiente. La ineludible necesidad de abordar el tema de las fugas se ha venido documentando profusamente en la literatura nacional e internacional. En el capítulo 2 se abordó este importante asunto. Desde hace varios años también se ha venido puntualizando los retos para disminuir el ANC o el NRW (y las fugas) para países de menor desarrollo relativo (**Kingdom et al, 2006; Liemberger et al, 2019**)), y que el tema de contabilidad del agua (*water accounting*, en inglés) es de una gran relevancia en la gestión del recurso (**Batchelor et al, 2016**)

Altos niveles de ANC van a afectar adversamente la capacidad para financiar la expansión de los servicios, así como su mantenimiento apropiado, la inversión en nuevas tecnologías y, en general, la sostenibilidad en la prestación de los servicios (**Blanco Sandoval, 2018**). Dentro de estos conceptos, las fugas deben ocupar un papel central en las estrategias para una gestión más sostenible del agua, especialmente en contextos de infraestructura envejecida. Otra gran razón para disminuir los niveles de ANC, tal como se mostró en esta investigación, es que, se subraya, ello representa menor presión sobre la oferta. Es decir, tanto conceptual como en la práctica, la gestión de fugas está en el centro de las estrategias de oferta y demanda de agua.

8.1.4 Financiamiento e inversión

Para México, la atención a una mayor calidad de los servicios de agua es una tarea apremiante. Esto pasa necesariamente por mejorar la infraestructura hidráulica y poner atención a su envejecimiento. Sin embargo, esta necesidad actual y futura se enfrenta a una situación de debilidad institucional y financiera. Si bien la información es incompleta, si se sabe que los últimos años México ha venido registrando una sistemática caída en el presupuesto e inversión en el sector y en su infraestructura hidráulica.

El presupuesto más reciente (2026) para la CONAGUA, es solo una muestra. Las cifras hablan por sí mismas: 0.1% del PIB, 0.33% del PEF, y 0.45% del gasto programable. Al considerar solo los programas relacionados con la infraestructura, se infiere que los recursos son todavía más limitados. Si se toma en cuenta la inversión en entidades distintas a CONAGUA, los montos siguen siendo extremadamente pequeños para atender bien los retos de una infraestructura que envejece. Esta situación contradice las expresiones oficiales de que el agua es un tema estratégico y de interés nacional.

Por supuesto, está también la exigencia por una mejor calidad y fiscalización del gasto en agua en general y en infraestructura hidráulica en particular. Se tiene la necesidad de saber con más certidumbre en qué y cómo se gasta. Como se argumentaba desde hace por lo menos 15 años para el contexto latinoamericano – México ciertamente incluido – se tienen grandes desafíos sobre la inversión en infraestructura (**Rozas, 2010; CEPAL, 2016a**, siendo uno de ellos la medición de los flujos de inversión (**CEPAL, 2016b**). Desde entonces se prevenía de que los recursos fiscales disminuirían y que se tenía que buscar fuentes alternativas de financiamiento. Las nuevas exigencias de una infraestructura resiliente al clima solo acentúan –y previsiblemente lo hará más en el futuro– las consecuencias de inversiones tan extremadamente limitadas y de insuficiente información sobre su calidad. En este contexto, resulta ineludible la necesidad de optimizar estas inversiones. A esta

conclusión llegaban los informes del Banco Mundial sobre el gasto público en México (**World Bank, 2005; Banco Mundial, 2007; World Bank, 2016**). Los resultados de este proyecto apuntan en esta dirección.

8.1.5 Infraestructura resiliente al clima

Infraestructura resiliente al clima es un tema recurrente en la literatura y discusiones internacionales sobre el tema. En los siguientes diez años los eventos climáticos extremos ocupan la posición #1 en los más recientes reportes de riesgos globales publicados por el Foro Económico Mundial. Organizaciones internacionales como el Banco Mundial, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, el Banco Interamericano de Desarrollo, y el Banco de Desarrollo para América Latina también confirman esta preocupación. Uno de los mensajes de fondo es que la construcción de resiliencia a desastres naturales requiere de una valoración muy cuidadosa de los riesgos y las vulnerabilidades de su infraestructura hidráulica.

Más particularmente, hay mucho de trabajo para gestionar y diseñar infraestructura resiliente a los fenómenos hidrometeorológicos extremos. En este sentido también se expresa la OCDE (**2024b**), en su compendio de buenas prácticas internacionales sobre **la calidad de la infraestructura** (nuestro énfasis). Quizás el mensaje más importante es que la construcción de resiliencia a desastres naturales requiere de una valoración muy cuidadosa de los riesgos y las vulnerabilidades al operar infraestructura que envejece. Los riesgos e impactos de la inacción o de medidas insuficientes y tardías son muy grandes.

Estas nuevas exigencias de una infraestructura resiliente al clima solo acentúan – y previsiblemente lo hará más en el futuro – las consecuencias de inversiones tan extremadamente limitadas. El financiamiento de estos futuros climático constituye un gran reto para el país, cuyo abordaje requerirá necesariamente incrementar el presupuesto federal para reflejar más en la realidad las prioridades expresadas en el discurso oficial de que el agua y su infraestructura son de relevancia estratégica. El caso Monterrey ejemplifica el gran reto que enfrentan varias regiones del país, incluyendo también a la Ciudad de México: aprender a convivir en un entorno climático de extremos -sequías e inundaciones.

Como se abordó textualmente en el capítulo 7, a la luz de los resultados, y la memoria tan corta, la gestión de los fenómenos hidrometeorológicos extremos se debería nutrir con perspectivas de la psicología de los desastres, para recordarle a la población que estos eventos van a regresar. Hace ya casi 20 años, en un texto clásico, sobre recursos hídricos, economía y política pública, **Shaw (2005, p. 289)** asentaba:

“Dado que las percepciones de la sociedad a estos eventos – inundaciones y sequías – cambian, **el público necesita ser recordado sobre los riesgos cuando éstos ya se han olvidado**... Todo esto está fundamentalmente atado a la economía, porque los proyectos públicos que mitigan las sequías y las inundaciones son costosos... Cuando se da la opción, el público bien puede votar contra el gasto en programas de protección a inundaciones y sequías, **toda vez que las preocupaciones acerca de estos eventos han disminuido**” (énfasis propio)

8.1.6 Políticas públicas *por diseño*, más informadas, más integradas y proactivas

Las conclusiones anteriores conducen a la necesidad de robustecer la planeación y gobernanza en torno al agua y a la infraestructura hidráulica en particular. Especialmente ante su envejecimiento. El fortalecimiento institucional, programático y financiero tendrían que ser, en la práctica y no solo en el discurso, parte central de esta mejoría. Una de las principales lecciones de la experiencia internacional en materia de desarrollo, es que la planeación de infraestructura es más efectiva cuando se tienen instituciones y regulaciones que funcionan (**World Bank, 2008**). En este contexto, hace sentido la propuesta de **González Villarreal y Arreguín Cortés (2022)**, de incorporar el envejecimiento de las obras como parte de una normativa – la cual, por supuesto incluye otros factores - orientada a fortalecer la seguridad de las presas de almacenamiento y derivación. Esta normativa, de acuerdo con los autores, también debería especificar las responsabilidades de los propietarios u operadores de la infraestructura en lo concerniente a la operación, mantenimiento y seguridad de las obras. Nuestro trabajo puede ayudar en esta dirección.

El país, como lo han venido expresando muchas voces autorizadas, no tiene mucho tiempo para seguir esperando. Como bien lo expresa **Gerstell (2023, p. ix)** para la arena internacional, “...se actúa lentamente ante un problema conocido”. **Los riesgos de la inacción o de medidas insuficientes y tardías son muy grandes.** El escenario *business as usual* no debería seguir orientando las decisiones. Como bien lo resume el Dr. Fernando González Villarreal y su equipo, al subrayar la necesidad de atender la infraestructura hidráulica de México que ya ha rebasado su vida útil: “,, se pondría en riesgo la totalidad de la infraestructura existente, independientemente de los altos costos que se pagarían por presentarse fallas en los sistemas” (**González Villarreal et al, 2022, p. 26**). Esta advertencia, bien sustentada por los hallazgos de esta investigación, nos regresa a la frase inicial de la introducción, autoría del Dr. Álvaro Aldama. De hace poco más de 20 años: “...Hoy es el tiempo de tomar decisiones...mañana puede ser demasiado tarde”.

8.2 Recomendaciones

8.2.1 Fortalecer los sistemas de información que contienen datos sobre infraestructura hidráulica en general y de su edad en particular

Actualizar las fuentes, los datos, indicadores y publicaciones esenciales sobre el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y su mantenimiento. Más particularmente, esto se puede focalizar en aquellas fuentes que proporcionan datos sobre la edad de la infraestructura. Esta es una tarea muy importante y urgente, aunque se reconoce las dificultades para llevarla a cabo, especialmente ante los recortes financieros tanto a CONAGUA como al INEGI. Contar con datos más actualizados siempre será una buena inversión para el país. Por ejemplo, los datos publicados por CONAGUA sobre los acueductos tienen un rezago de cinco años o aún mayor. Relacionado con este punto,

también se propone la incorporación en el portal de INEGI información y estadísticas que en varios casos están más actualizadas, y que están disponible en los portales de la Comisión Nacional del Agua.

En gran medida esto se solucionaría con incluir los enlaces a los portales de la Comisión y publicaciones clave correspondientes, tales como *Estadísticas del Agua en México* y el Informe sobre la *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Se vale reconocer que parte de esto ya lo hace INEGI en algunas de sus plataformas de consulta, al referirse, por ejemplo, al Sistema Nacional de Información del Agua (SINA) (<http://sina.conagua.gob.mx/sina/index.php>). Lo que faltaría es ampliar esta interconexión sobre información relevante, que podría ser acordada entre el Instituto con la Comisión, como un ejercicio sistemático. Otro enlace que luce como obligado sería al Portal de Sistemas de información del Agua, localizado en (<https://app.conagua.gob.mx/sistemasdeagua/>). En el sentido inverso, y en coordinación con el Instituto, CONAGUA podría referir en sus portales enlaces a fuentes del Instituto con información valiosa sobre el estado de la infraestructura; este sería el caso, por ejemplo, de la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental (ENCIG) (<https://www.inegi.org.mx/programas/encig/2023/>), la cual es poco conocida en el ámbito profesional del agua.

Ciberseguridad de datos estratégicos en infraestructura hidráulica

Relacionado con el fortalecimiento de los sistemas de información sobre infraestructura hidráulica, se vislumbra la ineludible necesidad de que el Estado mexicano invierta más en ciberseguridad. Los costos de no hacerlo pueden resultar muy cuantiosos. Como se reconoce en la arena internacional, la ciberseguridad de la infraestructura es un tema de interés y preocupación nacional (**Gerstell, 2023**, p. x). Habría que recordar que por varios días de abril 2023 el portal de la Comisión Nacional fue objeto de un secuestro cibernético. Por otro lado, esta desafortunada situación también puede constituirse en oportunidades para que INEGI y CONAGUA lideren un proyecto nacional de seguridad de datos estratégicos o esenciales en agua, en el cual las universidades también podrían participar. Este tema se retoma al final de este informe, como parte de las propuestas para fortalecer las estadísticas y métricas sobre infraestructura hidráulica. Los datos seleccionados sobre el envejecimiento de la infraestructura hidráulica podrían ser parte de un sistema de infraestructura estratégica en agua.

8.2.2 Homologar los portales de información sobre agua e infraestructura hidráulica de la propia CONAGUA.

Más particularmente, también se recomienda que la Comisión enlace más funcionalmente sus principales portales, como los referidos arriba. Esta recomendación necesitaría coordinación interna por parte de la Comisión. Actualmente es difícil y puede confundir la obtención de los datos, dependiendo de cuál es *la puerta de acceso*. Es decir, la vía de acceso misma determina la efectividad y eficiencia de las consultas de información. También

se encuentra la necesidad de sistematizar la información temática presentada, independientemente de la plataforma de acceso, para evitar, donde sea pertinente, duplicidades o inconsistencias en la forma en que se presenta la información.

Es muy importante brindar maneras más amigables para acceder a la información y los datos. Por ejemplo, la obtención del dato sobre la edad de las presas requirió un trabajo artesanal y muy costoso en términos de tiempo, al tener que consultar registro por registro en más de un sistema de información. Otro ejemplo lo da el poder contar con la edad de las estaciones climatológicas e hidrométricas. Para ello fue necesario la elaboración de un algoritmo que buscara este dato en diversas fuentes. La siguiente propuesta brinda más detalles sobre trabajo pendiente en materia de medición climatológica e hidrométrica.

8.2.3 Fortalecer la infraestructura de medición climatológica e hidrométrica

En esta investigación se ha encontrado que las redes de estaciones climatológicas e hidrométricas se han avejentado y su tamaño y calidad no guardan correspondencia con las exigencias actuales. Se tiene la necesidad de modernizar y ampliar las redes de medición, así como el acceso mismo de la información, en plataformas e interfases más amigables al usuario común y corriente. Es muy recomendable acercar la densidad de la red activa a parámetros internacionales, pues actualmente no se cumple con la densidad mínima recomendada por la Organización Meteorológica Mundial. Otro asunto crítico es el mantenimiento de esta infraestructura. Hasta donde se sabe, no existe un registro público ni accesible de los mantenimientos realizados.

8.2.4 Incrementar sustancialmente la inversión para la operación, mantenimiento, rehabilitación y reemplazo de infraestructura hidráulica estratégica, especialmente ante su envejecimiento

Ante un presupuesto con tendencia a la baja para el sector agua, México deberá encontrar las formas para financiar esta infraestructura. Más aún, el financiamiento de la infraestructura resiliente al clima es ya ahora un gran reto, y lo será aún más en el futuro. Con presupuestos a CONAGUA estimados en 0.1% del PIB no se ve cómo el país pueda salir adelante. En la investigación se subrayó que hay otros actores gubernamentales que invierten en el sector agua; sin embargo, su inclusión no cambia el hecho de que México invierte cantidades en extremo pequeñas para atender una cuestión que en el discurso se considera como de interés nacional. El presupuesto al sector contradice esta aseveración.

Para complicar más este escenario, la nueva visión de resiliencia sistémica requiere de inversión *ex ante*, como parte de enfoques más comprensivos e integrados. Una pregunta central, por lo tanto, es de qué fuentes provendrán estos recursos, especialmente ante el debilitamiento financiero e institucional, de gobernanza del agua que se tiene en el país. Una cuestión relacionada es que aun sin esta limitante financiera, está el hecho de que la realización de proyectos de infraestructura toma tiempo. Esto es particularmente relevante pues tiempo es justamente lo que no se tiene. Muchos proyectos no pueden esperar, se tienen que realizar oportunamente.

El tema del **mantenimiento y rehabilitación** es una asignatura pendiente para una gran parte de la infraestructura hidráulica de captación, almacenamiento, conducción, potabilización, distribución, y tratamiento. Esta es una situación muy grave pues si se sabe que mucha de esta infraestructura ya rebasó su vida útil. Este es el caso de las presas, las que no solamente almacenan agua para la población y las actividades económicas, sino que también protegen de inundaciones.

Es también el caso de los principales acueductos, varios de los cuales tienen entre 30 y 50 años de haberse construido. La antigüedad de estos acueductos se convierte en un grave riesgo para su adecuado funcionamiento. Son conocidas las constantes interrupciones en el servicio de agua a la CDMX, ante las fallas en el sistema Cutzamala y el limitado mantenimiento que se le da. En el caso de Monterrey, la crisis en el suministro de 2022 hizo visible que el acueducto de El Cuchillo requería mantenimiento urgente.

Por otra parte, la disponibilidad efectiva de agua potable en los hogares se asocia, entre otras razones, con la calidad de las redes de distribución. Con redes deterioradas e ineficientes u obsoletas, se compromete esta calidad. En el caso de las plantas de tratamiento, si solo se presupuesta la construcción y no el mantenimiento y rehabilitación de esta infraestructura, es normal que se tenga un amplio número de plantas que no están operando. Por supuesto, se reconoce que no solo se trata de gastar más, precisamente ante las restricciones financieras, sino de hacerlo con más efectividad, eficiencia y transparencia.

No es previsible que las grandes necesidades financieras para atender el envejecimiento de la infraestructura hidráulica y los retos climáticos actuando sobre ella puedan ser cubiertas solamente por el gobierno. El papel para la participación privada y la banca multilateral luce como obligado. No reconocer esta realidad solo compromete el presente y futuro desarrollo del país. Vale la pena subrayar que el costo de oportunidad al implementar políticas insuficientes o equivocadas no se expresa solamente en recursos financieros sino más significativamente en lo referente a vidas perdidas y el tiempo mismo – lo cual no se puede recuperar. En este marco la participación cuidada de la iniciativa privada y las instituciones multilaterales de desarrollo, como el BID y CAF, serán muy importantes.

Sin embargo, la cantidad de inversión no puede ser el único eje de las políticas. También **es fundamental mejorar la calidad de los flujos de inversión para la infraestructura**. Lograr lo anterior va a necesitar de una profunda reforma institucional y de orientar los incentivos para este propósito. Como se mostró en el capítulo 6, se tienen áreas de oportunidad en la eficiencia y efectividad del gasto e inversión, así como de mayor fiscalización del uso de los recursos destinados al sector, más aún cuando estos cada vez son menores. Las exigencias anteriores conducen naturalmente a la siguiente cuestión.

8.2.5 Diseño y construcción de una encuesta sobre la calidad de la infraestructura hidráulica y los riesgos de seguir operando sistemas que ya han rebasado su vida útil.

Avanzar a modelos y métricas más robustas para, por ejemplo, pronosticar la probabilidad de falla de sistemas o subsistemas de infraestructura hidráulica o dar elementos para la optimización de su mantenimiento, rehabilitación o reemplazo, requiere de información y datos que no se tienen disponibles en México. De nuestros resultados sobre el envejecimiento de la infraestructura tanto a nivel nacional como de las tres grandes metrópolis, se desprende la recomendación de construir una valoración cualitativa del estado de la misma, teniendo como referencia el reporte de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) y el enfoque japonés analizados en esta investigación, por supuesto con su adaptación al contexto del país. Noruega y los Países Bajos también tienen marcos analíticos que pueden ser de utilidad para nuestro país.

Esta encuesta, orientada a expertos y funcionarios con conocimiento del tema, permitiría calificar cualitativamente el estado de la infraestructura hidráulica, en sistemas seleccionados, como los estudiados en este trabajo (estaciones climatológicas e hidrométricas, presas, acueductos, plantas potabilizadoras y tratadoras, redes de distribución) o sus componentes. Esta calificación podría ir desde niveles aceptables a críticos, tal como se hace en estos enfoques estudiados en este proyecto. Identificar infraestructura crítica en riesgo sería una gran aportación. La escala espacial de la encuesta podría ser de carácter nacional en torno a los sistemas mencionados – con más finura en cuanto al foco – y metropolitana, con el énfasis en las tres grandes metrópolis. Esto es particularmente útil, pues en nuestro trabajo se muestra que la problemática del envejecimiento de la infraestructura metropolitana está territorialmente localizado. En ambos casos se podría construir una matriz cualitativa de riesgos por tipo de infraestructura, según sistema, edad y localización. Los resultados de este proyecto Tec-FGRA pueden aportar elementos iniciales en esta dirección.

El Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM) podría tomar el liderazgo de esta iniciativa. El CICM no solo tiene un comité de agua, el cual goza de un amplio reconocimiento, sino recientemente ha creado un consejo sobre políticas de infraestructura. Esta iniciativa también podría ser apoyada por otras instituciones – incluida por supuesto la FGRA – el Consejo Consultivo del Agua, ANEAS, INEGI, y el sector académico. Por supuesto, el Tecnológico de Monterrey estaría en la mejor posición de apoyar esta iniciativa.

8.3 Principales impactos del proyecto en las esferas de gobierno y sociedad

Se tiene la confianza de que los resultados de este proyecto, con el apoyo de la Fundación Gonzalo Río Arronte y otros actores clave, incidan en el diseño de políticas públicas más informadas sobre la infraestructura hidráulica en México, especialmente a la luz de su envejecimiento.

1 Documentar este fenómeno, el cual es de una gran relevancia para el país, es una de las dos grandes aportaciones comprometidas en este proyecto, lo cual se ha logrado y se

incluye en los capítulos 4 y 5. Al hacerlo, por primera vez en México se cuenta con un estudio documentado sobre el envejecimiento la infraestructura hidráulica, el cual señala los casos donde la situación luce más grave. Es el caso de las estaciones climatológicas e hidrométricas y las presas. Por sorprendente que parezca, es la primera vez que este ejercicio de documentación se centra en las tres grandes metrópolis del país. Este estudio puede servir de insumo a entidades gubernamentales, especialmente a la Comisión Nacional del Agua y a los organismos operadores de estas urbes. Hay otras entidades e instituciones a quienes les deberá interesar los resultados de este trabajo. Entre ellas están la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, el Colegio de Ingenieros Civiles de México, la Asociación Mexicana de Hidráulica, la Asociación de Empresas y Entidades de Agua y Saneamiento, y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

2 El estudio se fincó en una amplia revisión de la literatura nacional e internacional, la cual puede ser un **referente para los interesados en el tema**. Esta revisión, la cual considera fuentes actualizadas, fue muy importante para el diseño metodológico y la estructura temática del informe. El desarrollo del proyecto se apoya en más 230 fuentes consultadas, de las cuales poco más de 200 son referidas en el texto.. Es decir, este proyecto ayuda a poner al día la discusión nacional e internacional sobre la infraestructura y su envejecimiento, desde una perspectiva sistémica.

3 Otra contribución derivada de esta documentación es que **los resultados y datos sobre el envejecimiento de la infraestructura se pueden compartir con la comunidad interesada**. En este sentido, en el capítulo 4 del Informe se hace referencia al **Anexo (digital) 4**, donde se encuentra el acceso a información y datos relevantes, así como a resultados seleccionados. Este anexo tiene la liga a un archivo electrónico en Excel, en el cual se encuentran datos ya organizados sobre la edad de los sistemas de infraestructura aquí analizados (estaciones climatológicas e hidrométricas, presas y acueductos, por ejemplo). El Tecnológico de Monterrey y la Fundación podrán acordar una estrategia para dar a conocer este recurso de información.

4 Las contribuciones #2 y #3 se apoyan en una **métrica para medir el envejecimiento de la infraestructura hidráulica**. Este proyecto desarrolló una métrica cuya aplicación es de relativa facilidad y proporciona hallazgos sobre este fenómeno. El factor de envejecimiento relaciona la edad de servicio con la vida útil. Si bien estas dos variables tienen una naturaleza multifactorial, y por ende se tiene que estar consciente de las limitaciones del indicador, esta medida cumple con los requisitos de una buena métrica establecidos por la *International Water Association*. Se tiene la certeza de que esta métrica puede ser usada por la comunidad interesada para estudiar otros sistemas de infraestructura, en otras escalas territoriales, o en un futuro actualizar lo que este informe presenta. Es decir, la selección de esta métrica es sí misma una contribución del proyecto. De hecho, desde el inicio se consideró en la propuesta a la Fundación que esta selección era un entregable.

5 De este trabajo se desprenden orientaciones para el abordaje de áreas de oportunidad por las instancias gubernamentales con responsabilidad en el tema de la **generación y divulgación de datos sobre el tema de este estudio**. El capítulo 3 mostró que se tienen

alcances y limitaciones en torno a la disponibilidad y consulta de información y datos relevantes a los sistemas de infraestructura aquí estudiados. Más específicamente, el **Anexo 3** contiene un análisis muy pormenorizado de las dificultades para consultar y extraer estos datos. Este anexo por sí solo puede ser de gran valor para diversas instancias de la Comisión Nacional del Agua, y para toda la comunidad interesada en la búsqueda de información sobre infraestructura hidráulica.

El capítulo también contiene un análisis actualizado de las fuentes de información sobre agua que publica el INEGI y que normalmente no son conocidas en el ámbito del agua. Es el caso de la Encuesta Ingreso Gasto de los Hogares y de la Encuesta Nacional de Calidad e Impacto Gubernamental. Estas encuestas contienen información sobre la calidad de los servicios de agua, de valor para la comunidad con responsabilidad e interés en los temas de la infraestructura. Los censos económicos contienen una muy amplia información sobre los organismos operadores de agua en el país, aunque, como en el caso de las encuestas, falta conocimiento en el sector agua sobre esta información, a pesar de que la misma procede de los mismos organismos. Además de estas fuentes, el capítulo 3 (Marco Metodológico) analiza lo que otras instancias publican sobre el tema de la infraestructura hidráulica, tales como el Instituto Mexicano para la Competitividad y el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Si bien en este documento, se le reserva un lugar especial a la relación que se ha construido con el INEGI y las avenidas de colaboración que se perfilan, aquí se señala que resultados preliminares de nuestro proyecto fueron presentados al Instituto en su sede de Aguascalientes, el 12 de noviembre de 2025. Fue muy positivo que sus especialistas reconocieran valor en nuestro proyecto y supieran que este contiene el análisis de la información ya referida arriba. Por otra parte, enterarse de primera mano de lo que el Instituto publica fue muy benéfico para nuestra investigación.

6 El análisis y la base de datos generada en torno al **envejecimiento de las estaciones climatológicas e hidrométricas** puede considerarse como un **subproducto de este proyecto**, con un alto valor para la Comisión Nacional del Agua. Las primeras son de interés primario del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), las segundas de la Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR). No hay un trabajo similar en México que considere la totalidad de las estaciones del país y la porosidad de la base de datos que se pudo ensamblar. Como se explica en el informe, se tuvo que construir un algoritmo para que de estas dos fuentes de información se extrajera el año de inicio de cada estación y así poder calcular su edad y su factor de envejecimiento. Entre ambas estaciones se tiene cerca de nueve mil registros. En la medida que se fue desarrollando esta investigación, se iba haciendo más atractiva la idea de que la Fundación y el Tec entregaran este subproducto a la CONAGUA (y, particularmente al SMN)

7 Esta investigación también se pensó para contribuir a discusiones informadas sobre el tema, con funcionarios y expertos, de tal forma que se contara con elementos de calidad sobre la valía de este proyecto, su desarrollo y exposición de resultados. Este fue el propósito de la **realización de los cuatro seminarios técnicos especializados** que tuvieron lugar en Monterrey (2, Ciudad de México (1) y Guadalajara (1). El **Anexo RE1**

contiene un análisis de estos seminarios y sus alcances. De hecho, este anexo contiene las respuestas a los cuestionarios que fueron diseñados para recoger las perspectivas, con base en su experiencia, de funcionarios y técnicos con responsabilidad en la gestión del agua urbana, así como el papel y el estado de la infraestructura hidráulica.

Es también el caso de la **conferencia internacional** llevada a cabo en el Campus Monterrey del Tecnológico, el 20 de noviembre de 2025. El desarrollo de la conferencia fue muy exitoso, como se puede apreciar por la audiencia proveniente de amplios sectores de la comunidad nacional, atraídos por un programa que tuvo expositores de probada experiencia y calidad nacional e internacional. La siguiente liga contiene el acceso a los materiales de la conferencia (programa, conferencias, fotografías del evento): <https://centrodelagua.tec.mx/es/envejecimiento-infraestructura>. El **Anexo RE2** contiene un análisis detallado de la conferencia. Estos materiales están alojados en el portal del Centro del Agua del Tecnológico de Monterrey, con acceso abierto a toda la comunidad interesada. Se considera que se abre una gran avenida para que el Tecnológico y la Fundación orquesten una campaña de divulgación del proyecto en su conjunto y de los materiales de la conferencia en particular.

En conjunto, este proyecto ha ayudado a posicionar el tema del envejecimiento de la infraestructura hidráulica en México y América Latina. En este sentido, se tuvieron conversaciones con el INEGI para, en el marco de los resultados de este proyecto explorar avenidas de colaboración científica con el Tecnológico de Monterrey. También se tienen lazos con otros actores como el Consejo Consultivo del Agua, el Fondo Ambiental Metropolitano de Monterrey, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), el Colegio de Ingenieros Civiles de México, y ANEAS, entre otros. Es de señalar que el BID ha expresado interés en escalar los resultados de este proyecto a América Latina.

8 Los resultados de este proyecto deben ser de **interés para CONAGUA e INEGI**, no solo en sus correspondientes ámbitos de competencia sino también en conjunto. Como se ha mostrado en esta investigación, se tiene cruces y complementariedades en los sistemas de información de ambas instituciones. Como se ha mencionado antes, la FGRA podría hacer una entrega formal de este informe a estas dos entidades.

9 Tal como se comprometió desde un principio en la propuesta, se tiene contemplada la publicación de los resultados del proyecto en **dos artículos científicos en revistas de alto impacto**. Se tiene reservados los fondos para los gastos de publicación y el acceso abierto de las publicaciones. Las revistas seleccionadas son *Water Infrastructure Research* y *Sustainable Cities and Society*.

10 Probablemente el impacto más grande del proyecto es el interés que sus resultados han despertado en el INEGI. Esto tiene una enorme significancia al ser el Instituto la entidad del Estado mexicano con la atribución de generar información y estadísticas relevantes para el desarrollo del país. Desde un principio se mantuvieron conversaciones sobre el origen y alcances y desarrollo del proyecto. En el taller que se llevó a cabo en la sede del instituto en Aguascalientes, se estableció con claridad que el propósito era "...explorar posibilidades de colaboración entre el Tecnológico de Monterrey y

el INEGI sobre información y estudios relacionados con agua e infraestructura hidráulica nacional”

Esta reunión fue presidida por el Mtro. Mauricio Márquez Corona, vicepresidente del Sistema Económico, y contó con la asistencia de directivos y todos los especialistas del Instituto que trabajan las diferentes dimensiones del tema del agua. El taller fue conducido por la Dra. Laura Vázquez Maggio, directora general de Integración, Análisis e investigación. Los resultados de nuestro proyecto fueron bien recibidos y nosotros nos pudimos beneficiar de un intercambio de primera mano con el personal técnico del Instituto así como con el vicepresidente Márquez y otros cuadros directivos del INEGI, tanto de la sede Aguascalientes como de personal conectado desde la Ciudad de México.

En breve se establecerán conversaciones con el vicepresidente Márquez, para llevar a cabo la segunda reunión acordada, para entonces estudiar cómo los resultados de nuestro proyecto pueden ser capitalizados por el INEGI en la generación y divulgación de información y datos sobre infraestructura hidráulica. Esto constituye un reconocimiento a este proyecto conjunto Tec-FGRA. El **Anexo RE3** contiene un informe más detallado de la visita a la sede del INEGI.

8.4 Proyectos a futuro

1 En un corto plazo sería conveniente una estrategia para dar a conocer los resultados de este proyecto, entre las audiencias interesadas en este importante tema del envejecimiento de la infraestructura hidráulica. Retomando lo expresado en el punto 10 arriba, se continuarán las conversaciones y los acuerdos sostenidos con INEGI, para que el Instituto pueda capitalizar los resultados de este proyecto. Por lo que se refiere a CONAGUA, ya se han indicado propuestas específicas para que la Comisión también se beneficie de los resultados de esta investigación.

2 Se está en conversaciones con el Fondo Ambiental Metropolitano de Monterrey (FAMM), y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, para presentar en Monterrey el informe final del proyecto Tec-FGRA y el reporte 2025 de la Sociedad sobre el estado de la infraestructura en los Estados Unidos (en su vertiente de agua). Se espera que este evento atraiga una audiencia nacional muy amplia: los colegios de ingenieros, escuelas de ingeniería, cámaras como la CMIC, directores de organismos operadores, investigadores y estudiantes. El apoyo de la FGRA es, por supuesto, bienvenido.

3 Se considera que los resultados de este proyecto pueden nutrir un curso corto para periodistas de investigación. Se invitaría a periodistas de medios nacionales y de las tres grandes metrópolis. Se tendría que orquestar el financiamiento para llevar a cabo este proyecto. Ya en el pasado el Centro del Agua ha realizado diplomados para periodistas, con resultados muy satisfactorios.

4 Con el acuerdo de la FGRA, se contempla la posibilidad de publicación de un libro en una editorial de circulación nacional o internacional del informe del proyecto. En el segundo caso,

se piensa que Springer y Routledge serían buenas opciones. Se estaría buscando el financiamiento para ello.

5 Impacto en el currículo universitario, al dar a conocer en las escuelas y facultades de ingeniería y economía seleccionadas los resultados de este proyecto. Este sería un proyecto con resultados a mediano plazo. El análisis realizado de los planes de estudio de las carreras de ingeniería civil y economía (de la UNAM, el Tecnológico de Monterrey, la UAM, la UdG y la UANL) muestra un debilitamiento en los contenidos sobre hidráulica, obras hidráulicas, crecimiento y desarrollo económicos (y aquí el papel de la infraestructura). Una contribución relacionada sería la realización de tesis de grado sobre el tema del envejecimiento de la infraestructura hidráulica.

Bibliografía

Abdel-Mottaleb, N., Saghand, P., Charkhgard, H. & Zhang, Q. (2019), “An exact multi-objective optimization approach for evaluating water distribution infrastructure criticality and geospatial interdependence”, *Water Resour. Res.*, **55** (7), 1-22. Citado por Kim et al (2024, p.2).

AbuEltayef, H.T. , AbuAlhin, K.S., & Alastai, K.M. (2023), “Addressing non-revenue water as a global problem and its interlinkages with sustainable development goals”, *Water Practice and Technology*, Vol. 18, No. 12, 3175 doi: 10.2166/wpt.2023.157.

Abu-Samra, S., Ahmed, M. & Amador, L. (2020), “Asset management framework for integrated municipal infrastructure”, *Journal of Infrastructure Systems*, 26(4), 04020039. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943.555x.0000580](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943.555x.0000580). Citado por Daulat et al (2024, p. 879).

Aguilar Barajas, I. y Ramírez Orozco, A. (2023), “Estadísticas y Métricas sobre Infraestructura Hidráulica en México”, pp. 229-329, en E. Provencio Durazo (Coord.). *Medición de Infraestructura. Informe Final. Grupo Técnico de Expertos en Infraestructura en México*, Ciudad de México, INEGI y UNAM (PUED), noviembre.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/investigacion/grupos/doc/medicion_infraestructura_vfinal.pdf
<https://pued.unam.mx/opencms/publicaciones/60/medicion.html>

Aguilar Barajas, I. y Ramírez Orozco, A. (2021). *Agua para Monterrey. Logros, retos y oportunidades para Nuevo León y México*, Monterrey, N.L., Tecnológico de Monterrey.
<https://repositorio.tec.mx/handle/11285/642843>

Aguilar-Barajas, I, Sisto, N.P., Ramírez, A.I., y Magaña-Rueda, V. (2019) “Building Resilience and the Co-production of Knowledge in the face of extreme weather events: lessons from

Hurricane Alex, Monterrey Metropolitan Area (Mexico)", *Environmental Science and Policy* 99 (2019):37-47.

Aguilar-Barajas, I., Sisto, P. N., Magaña-Rueda, V., Ramírez-Orozco, I., y Mahlkecht, J. (2016) "Drought Policy in Mexico: a long, slow march toward an integrated and preventive management model", *Water Policy*, 18 (2016), pp. 107-121. DOI: 10.2166/wp.2016.116.

Aguirre Díaz, R. (2014), "Plan Agua para el Futuro de la CDMX", *Revista Ingeniería Civil*, Núm. 541, mayo, pp. 20-24.

Albarrán Núñez, J.F. (2021), "Mantenimiento: consecuencia del diseño del proyecto", *Ingeniería Civil*, Núm 618, abril. Pp. 10-12.

Aldama Rodríguez, A. (2004), "El agua en México: una crisis que no debe ser ignorada", pp. 11-31, en M.A. Jacobo Villa y E.S. Fernández (Coords.), *La Gestión del Agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable*, México, D.F., UAM y Miguel Ángel Porrúa.

Alegre, H. & Coelho, S. (2013), Infrastructure asset management of urban water systems. *Water Supply Systems Analysis – Selected Topics*, 49-74, citado por Kim et al (2024, p. 13)

Alegre, H., and Coelho, S.T., (2012), *Infrastructure Asset management of Urban Water Systems*, National Civil Engineering Laboratory, Lisbon, Portugal, citado por Cantos y Juran (2019, p. 4).

Armenta, H., y Collado, J. (2019), *Apuntes sobre la Gestión Hídrica y la Infraestructura Hidráulica*, Monterrey, N.L., RECSA.

Arreguín Cortes, F. y González Villarreal, F. (2020), "Medidas de adaptación de las presas al cambio global", *Ingeniería Civil*, Núm 614, noviembre-diciembre, pp. 24-28.

Arreguín Cortez, F., López - Pérez, M., Ortega - Gaucin, D., e Ibáñez Hernández, O. (2016a). "La política pública contra la sequía en México: avances, necesidades y perspectivas", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol VII (5), septiembre-octubre, pp. 63-76.

Arreguín - Cortez, F., López - Pérez, M., y Marengo-Mogollón, H. (2016b). "Las inundaciones en un marco de incertidumbre climática", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol VII (5), septiembre-octubre, pp. 5-13.

Arganis Juárez, M.L., Domínguez Mora, R., Jiménez Espinoza, M. y Guichard Romero, D. (2010), "Eventos extremos", pp. 563-594, en B. Jiménez, M.L. M.L. Torregrosa y L. Aguilar Aboites, L. (Eds.), *El Agua en México: cauces y encauces*, México, D.F., Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua

Arias-Rojo, H.M. and Salmón-Castelo, R.F. (2019), "Mexican Water Sector: A Brief Review of Its History", pp. 19-51, en H.R. Guerrero García Rojas (Ed.), *Water Policy in Mexico. Economic, Institutional and Environmental Considerations*, Cham, Switzerland, Springer International Publishing, Global Issues in Water Policy 20.

Arriaga Vázquez, D. (2021), “La gestión de riesgos en los proyectos”, *Ingeniería Civil*, Núm, 624, octubre, pp. 32-34.

ASCE (2025), *Infrastructure Report Card 2025*, Reston, American Society of Civil Engineers.
<https://infrastructurereportcard.org/>

Athie Flores, K. (2022), “Prioridad al agua para frenar el colapso en las ciudades y el campo”, *Ingeniería Civil*, Núm. 628, pp. 24-28.

Baena Ordaz, E. (2021), “Inversiones para el mantenimiento de infraestructura”, *Ingeniería Civil*, Núm. 618, abril. Pp. 21-23.

Banco Mundial (2013). *Informe sobre el Desarrollo Mundial 2014. Riesgo y Oportunidad. La administración del riesgo como instrumento de desarrollo*, Washington, D.C., Banco Internacional de Reconstrucción y Fomento <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/844111468151156193/informe-sobre-el-desarrollo-mundial-2014-riesgo-y-oportunidad-la-administracion-del-riesgo-como-instrumento-de-desarrollo-panorama-general>.

Banco Mundial (2007), *MÉXICO. Revisión del Gasto Público en Agua*, Washington, D.C., Banco Mundial. Informe No. 36942-MX.

Banco Mundial (1994), *Informe sobre el Desarrollo Mundial 1994: Infraestructura y Desarrollo*, Washington, D.C., Banco Mundial.

Banxico (2020), *Riesgos y Oportunidades Climáticas Y Ambientales del Sistema Financiero de México*, Ciudad de México, Banco de México. <https://www.banxico.org.mx/sistema-financiero/d/%7B828DDC4B-D078-157F-8486-141F3103FA87%7D.pdf>

Barking, D. (2006), (Coord.), *La Gestión del Agua en México. Retos, debates y bienestar*, Guadalajara y México, D.F. UdG y UAM

Batchelor, Ch., Hogeveen, J., Faurés, J-M., y Peiser, L. (2016), *Water Accounting and Auditing. A Source Book*, FAO Water Reports, Rome, Food and Agricultural Organization of the United Nations.

Bernardini, P., Van Vuren, S. , Van der Wiel, W.D., Wolters, M., Roovers, G. And Tosserams, M. (2014), “Integrative framework for the long term reinvesting planning for the replacement of hydraulic structures”. *PIANC World Congress San Francisco*, USA,

Beygi, S. & van Zyl (2024), “Towards more realistic stochastic modelling of leakage in water distribution systems”, *Water Supply*, **24**(11), 3831 doi: 10.2166/ws.2024.230

Blanco Sandoval, E. (2018), “Evaluación del servicio de agua y atención a usuarios en la CDMX”, *Revista H2O Gestión del Agua*, Núm. 17, marzo, pp. 26-32.

Brichetti, J.P., Mastronardi, L., Rivas Amiassorbo, M.E., Serebrisky, T., y Solis, B. (2021), *La Brecha de la Infraestructura en América Latina*, Washington, D.C., Banco Interamericano de Desarrollo.

Butler, D., Digman, Ch., Makropoulos, Ch. & Davies, J. (2025), *Urban Drainage*, Fifth Edition, Boca Raton y Abingdon, CRC Press.

Cano, J. (2025), *Ley General de Aguas: sin la inversión para hacerse realidad*, México Evalúa, Nota del 11 de diciembre, 2025. <https://mexicoevalua.org/ley-general-de-aguas-sin-la-inversion-para-hacerse-realidad/>.

Cantos, W.P. and Juran, I. (2019), “Infrastructure aging risk assessment for water distribution system”, *Water Supply*, 19.3 doi: 10.2166/ws.2018.139.

Castillo, A. (2025), “Rezagos en Infraestructura Hídrica y Recorte al Presupuesto de CONAGUA en 2026”, *Ethos. Innovación y Políticas Públicas*, Nota del 3 de octubre de 2025. https://www.ethos.org.mx/desarrollosostenible/columnas/rezagos_en_infraestructura_hidrica_y_recorte_al_presupuesto_de_conagua_en_2026

Cavallo, E., Powell, A., y Serebrisky, T. (Eds.) (2020), *De Estructuras a Servicios: El camino a una mejor infraestructura en América Latina y el Caribe*, Washington, D.C., Banco Interamericano de Desarrollo. Disponible en: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/De-estructuras-a-servicios-El-camino-a-una-mejor-infraestructura-en-America-Latina-y-el-Caribe.pdf>

CENAPRED (2014), “Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010”, en N. García Arróliga, R. Marín Cambrains, K. Méndez Estrada y R. Reyes Rodríguez (eds.), *Impacto socioeconómico de los desastres naturales*, México, Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Citado por Mendoza Tinco et al (2019, p. 4).

CENAPRED (2022). *Impacto Socioeconómico de los Principales Desastres Ocurridos en la República Mexicana en 2022*, Ciudad de México, Subdirección de Estudios Económicos y Sociales, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana.

CEPAL (2025). *Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2025. Movilización de recursos para el financiamiento del desarrollo*, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/82263-estudio-economico-america-latinacaribe-2025-movilizacion-recursos>

CEPAL (2016a), “Situación y desafíos de las inversiones en infraestructura en América Latina”, *Boletín FAL*, Edición No. 347, Número 3, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina.

CEPAL (2016b), “Expertos recalcan la importancia de mejorar la medición de la inversión infraestructura en América Latina y el Caribe”, Sección Noticias, 11.10.2016

CICM (1995), “Editorial. Cultura de la Conservación”, *Ingeniería Civil*, No. 312, abril, p. 7

CTMMA (2003), *El recurso hídrico en México. Análisis de la situación actual y perspectivas futuras*, México, D.F., Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C. y Miguel Ángel Porrúa.

Collin, F., & Blin, F. (2019), *Ageing of Infrastructure. A Life Cycle Approach* Boca Raton, CRC Press.

Comité Técnico del Agua - CICM (2024), “La infraestructura del agua en México”, *Ingeniería Civil*, Núm. 657, octubre, pp. 4-10

CONABIO (2024). *Portal de geoinformación 2024. Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad (SNIB)*. Ciudad de México, Comisión Nacional para la Biodiversidad. Disponible en <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>

CONAGUA (2025). *Sistema de Información Hidrológica*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. <https://sih.conagua.gob.mx/>

CONAGUA (2024a). *Situación de los recursos hídricos. Sistema Nacional de Información del Agua (SINA)*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://www.gob.mx/CONAGUA/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos#:~:text=M%C3%A9xico%20cuenta%20con%20una%20red,65%25%20de%20la%20superficie%20nacional>.

CONAGUA (2024b). *Estadísticas del Agua en México (Edición 2023)*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. Disponible en https://sinav30.CONAGUA.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

CONAGUA (2024c). *Sistema Nacional de Información del Agua*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://sinav30.CONAGUA.gob.mx:8080/SINA/>

CONAGUA (2024d). *Servicio Meteorológico Nacional. Climatología*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. Disponible en <https://smn.CONAGUA.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/mapas-de-climatologia-1981-2010>

CONAGUA (2024e) *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Edición 2024*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/960719/DSAPAS-2024-c.pdf>

CONAGUA (2023). *Atlas del agua en México 2023*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Planificación Hídrica. Disponible en https://sinav30.CONAGUA.gob.mx:8080/port_publicaciones.html

CONAGUA (2021), *Estadísticas del Agua en México Edición 2021*, Ciudad de México, Comisión Nacional del Agua, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2021.pdf

CONAGUA (2014), *Política Pública Nacional contra la Sequía. Informe Documento Rector PRONACOSE*, México, D.F., Comisión Nacional del Agua.

CONAGUA (2011), *Agenda del Agua 2030*, México, D.F., Comisión Nacional del Agua, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAGUA (2009), *Iniciativas Estratégicas 2009*, México, D.F., Comisión Nacional del Agua, documento interno sin publicar.

CONAGUA (2006), *La Gestión del Agua en México. Avances y retos 2006*, México, D.F., CONAGUA.

Dandy, G. & Engelhart, M. (2006), "Multi-objective trade-offs between costs and reliability in the replacement of water mains, *J. Water Resour Plann. Manage.*, **132** (2), 79-88. Citado por Kim et al (2024, p. 2)

Daulat, S., Roghani, B., Rokstad, M.M. & Tscheikner-Gratl, F. (2024), "Hotspot analysis for integrated asset management", *Water Science and Technology*, Vol. 90 No. 3, 878 <https://doi.org/10.2166/wst.2024.248>.

Daulat, S., Rokstad, M.M., Kein-Paste, A., Langeveld, J. & Tscheikner-Gratl, F. (2022), "Challenges of integrated multi-infrastructure asset management: A review of pavement, sewer, and water distribution networks", *Structure and Infrastructure Engineering*, pp. 1-20. <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2119480>. Citado por Daulat et al (2024, p. 879).

Defnes, R. et al (2019), "The missing economic risks in assessment of climate change impacts", *Policy Insight*, septiembre. The Earth Institute, Columbia University

Domínguez, J. y López, C. (2023), *Agua y ciudades*, Ciudad de México, Colmex.

Doumbia, D y Lauridsen, M.L. (2019). "Closing the SDG Financing Gap – Trends and Data", EM Compass Nota técnica 73, octubre, International Finance Corporation. Disponible en: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/842b73cc-12b0-4fe2-b058-d3ee75f74d06/EMCompass-Note-73-Closing-SDGs-Fund-Gap.pdf?MOD=AJPERES&CVID=mSHKI4S>

Durán Juárez, J.M y Torres Rodríguez, A. (2006), "¿Agua para Guadalajara?", pp. 217- 234, en D. Barkin (2006) (Coord.), *La Gestión del Agua en México. Retos, debates y bienestar*, Guadalajara y México, D.F. UdG y UAM.

Frangopol, D.M. & Tsompanakis, Y. (eds) (2024), *Maintenance and Safety of Aging Infrastructure*, Structures and Infrastructures Serie 10 Abingdon y Boca Raton, CRC Press.

Echavarría Soto, B. (2015), “Retos y Soluciones para el Drenaje de la Capital” *Revista H2O Gestión del Agua*, Núm.8, octubre-diciembre, pp. 4-10.

EPA (2009), “*Rehabilitation for wastewater collection and water distribution systems – State of technology review report.*” EPA/600/R-09/048, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH. Citado por Selvakumar & Tafuri (2012, p. 205).

Escolero, O., Krilisch, S., Martínez, S.E., y Perevochtchikova, M. (2018), “Hidrogeología y Vulnerabilidad del Abastecimiento de Agua”, pp. 58-78, en M. Perló Cohen y L. Castro-Reguera Mancera, *La crisis del agua y la metrópoli. Alternativas para la Zona Metropolitana del Valle de México*, Ciudad de México, Siglo XXI Editores y Escuela de Administración Pública de la Ciudad de México, Biblioteca Básica de las Metrópolis 04.

Esfhani, H.S. (2008), “Comments on “Infrastructure and Development: A Survey of Recent and Upcoming Issues” by Antonio Estache”, pp. 83-85, en Bourguignon y B. Pleskovic (eds.), *Annual World Bank Conference on Development Economics – Global 2007. Rethinking Infrastructure for Development*, Washington. D.C, Banco Mundial.

Estache, A. (2008), “Infrastructure and Development: A Survey of Recent and Upcoming Issues”, pp. 47-82, en Bourguignon y B. Pleskovic (eds.), *Annual World Bank Conference on Development Economics – Global 2007. Rethinking Infrastructure for Development*, Washington. D.C, Banco Mundial.

Fernández, D., Muntañez, A., y Sarmanto, N. (2023), *Diagnóstico de la prestación de los servicios de agua potable y alcantarillado en México*, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Naciones Unidas. Disponible en <https://www.cepal.org/es/publicaciones/49001-diagnostico-la-prestacion-servicios-agua-potable-saneamiento-mexico>

Fernández Esparza, A. y Ochoa Alejo. L. H. (2014), “Plan para eliminar fugas en la Ciudad de México”, *Revista H2O Gestión del agua*, Núm. 3, julio-septiembre, pp. 20-24.

Friedrich Ebert Stiftung (2017), *El agua en México. Actores, sectores y paradigmas para una transformación social-ecológica*, Ciudad de México, Friedrich Ebert Stiftung.

Fuentes Nava, E. (2025), “Garantizar el Derecho Humano al Agua con 19 centavos: El de Caso México en 2026”. *Club iAgua*. Blogs de iAgua. Gestión del agua. 12.12.2025. <https://www.iagua.es/blogs/estrellita-fuentes-nava/garantizar-derecho-humano-al-agua-19-centavos-caso-mexico-2026>

Furtado, de Oliveira Novares, C.A. and Marques, R.C. (2022), “Regulation of Urban Stormwater management is not a matter of choice but performance”, *Water Policy*, Vo. 24, No. 8, 1325, doi: 10.2166/wp.2022.097.

Ganguly, A.R., Bhatia, U & Flynn, S. E. (2021), *Critical Infrastructure Resilience. Policy and Engineering Principles*, Nueva York y Abingdon, Routledge.

Gerstell, G.S. (2023), “Foreword”, pp. ix-xiii, en D. Spaniel (ed.), *Securing the Nation’s Critical Infrastructures. A Guide for the 2021-2025 Administration*, Boca Raton y Abingdon, CRC Press & The Institute for Critical Infrastructure Technology (ICIT)

Gobierno de México (2020). Metrópolis de México 2020. Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano, Consejo Nacional de Población, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Godfrey, J.M y Chalmers (eds.) (2012), *Water Accounting. International Approaches to Policy and Decision Making*, Cheltenham y Northampton, Edward Elgar.

González Reynoso, A. (2018), “La Escala regional de los problemas de abastecimiento de agua y drenaje de la Ciudad de México”, pp. 79-109 en M. Perló Cohen y L. Castro-Reguera Mancera, *La crisis del agua y la metrópoli. Alternativas para la Zona Metropolitana del Valle de México*, Ciudad de México, Siglo XXI Editores y Escuela de Administración Pública de la Ciudad de México, Biblioteca Básica de las Metrópolis 04.

González Villarreal, F., y Arreguín Cortés, F.I. (2022), “Normativa para la seguridad de las presas de almacenamiento y derivación”, *Ingeniería Civil*, Núm. 632, julio, pp. 9-13.

González Villarreal, F.J., Vázquez Herrera, E., y Arriaga Medina, J. A. (2024), *Perspectivas del Agua en el Valle de México. Propuestas hacia la seguridad hídrica*, Ciudad de México, Red del Agua UNAM, Centro Regional de Seguridad Hídrica bajo los Auspicios de la UNESCO, y Agua Capital

González Villarreal, F.J., Vázquez Herrera, E., Aguilar Amilpa, E., y Arriaga Medina, J. A. (2022), *Perspectivas del Agua en México. Propuestas hacia la seguridad hídrica*, Ciudad de México, Red del Agua UNAM, Centro Regional de Seguridad Hídrica bajo los Auspicios de la UNESCO, y Agua Capital

Graizbord, B. y Arroyo Alejandro, J. (2019), *Agua, el futuro ineludible*, Guadalajara y Ciudad de México, Universidad de Guadalajara, El Colegio de México y Profmex/World y Juan Pablos Editor.

Grieg, N. (2023), *Water Resources Management. Principles, Methods and Tools*, Hoboken, Nueva Jersey, Wiley.

Guerrero García Rojas, H.R. (2019), *Water Policy in Mexico. Economic, Institutional and Environmental Considerations*, Cham, Switzerland, Springer International Publishing, Global Issues in Water Policy 20.

Guerrero García Rojas, H.R, Yunez-Naude, A., y Medellín-Azuara J. (2008) (Coords), *El agua en México. Consecuencias de las políticas de intervención en el sector*, México, D.F., El Trimestre Económico, FCE, Lecturas 100.

Harsha, J. (2019), “Ageing Large Dams and Future Water Crisis”, *Economic and Political Weekly*, June 29, 44 (26&27), 36-42.”

Herrera Anda, C.A. (2021), “Calificación de la Infraestructura en EUA”, *Revista Ingeniería Civil*, Núm. 623, septiembre, pp. 20-23

Herrera Toledo, C. (2024), “La gestión del agua en el Valle de México”, *Revista H2O Gestión del agua*, Núm. 35, abril, pp. 4-13.

Herrera Toledo, C. y Macías Nava, S. (2021), “Un escenario de agua sostenible para el Valle de México”, *Revista Ingeniería Civil*, Núm. 625, noviembre - diciembre, pp. 8 - 11.

Idegeo (2024). *Servicios de información geoespacial. Localidades dispersas de México.*, Ciudad de México, CONAPO-INEGI. Disponible en https://idegeo.centrogeo.org.mx/layers/geonode%3A_62527_dispersas_gw84.

IFC (2016), *EM Compass*, International Finance Corporation, World Bank Group, Nota 14, September.

IMCO (2025), *Índice de Competitividad Estatal 2025*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad, (<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-estatal-2025/>)

IMCO (2024a). *Nearshoring: Prioridades para el desarrollo regional*. Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad A.C. y Friedrich Naumann Stiftung.

IMCO (2024b), *Índice de Competitividad Urbana 2024*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad. (<https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-urbana-2024/#tableros>)

IMCO (2024c), *Informe Estatal del Ejercicio del Gasto 2024*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad. (https://imco.org.mx/wp-content/uploads/2024/06/DOCUMENTO_IEEG_2024_18Jun24.pdf)

IMCO (2023a), *Aguas en México, ¿escasez o mala gestión?*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad, febrero.

IMCO (2023b), “México enfrenta sequías sin recursos suficientes: Presupuesto 2024 para la Comisión Nacional del Agua”, *Nota Informativa del Instituto Mexicano para la Competitividad*, Ciudad de México, 10 de octubre.

IMCO (2022a), *Índice de Competitividad Estatal 2022*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad, Disponible en <https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-estatal-2022/>)

IMCO (2022b), *Informe Estatal del Ejercicio del Gasto*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad, Disponible en <https://imco.org.mx/informe-estatal-del-ejercicio-del-gasto-ieeg/>

IMCO (2021), *Índice de Competitividad Urbana 2021*, Ciudad de México, Instituto Mexicano para la Competitividad, Disponible en <https://imco.org.mx/indice-de-competitividad-urbana-2021/>)

IMEPLAN (2025). Instituto de Planeación y Gestión del Desarrollo del Área Metropolitana de Guadalajara. <https://www.imeplan.mx/area-metropolitana-de-guadalajara>

INEGI (2025a), *Encuesta Nacional de Ingreso Gasto de los Hogares 2024*, Aguascalientes, Instituto Nacional de Geografía y Estadística <https://www.inegi.org.mx/programas/enigh/nc/2024/>

INEGI (2025b), *Censos Económicos 2024*, Aguascalientes, Instituto Nacional de Geografía y Estadística. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>

INEGI (2024), *Encuesta Nacional de Calidad Gubernamental 2023* (<https://www.inegi.org.mx/programas/encig/2023/>)

INEGI (2022), *Principales Resultados del Censo de Población y Vivienda 2020*, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

IWA (2020), *Reducing Urban Water Losses, How Water Utilities Can Improve Efficiency and Meet Future Demand for Water*, London, The International Water Association, citado por AbuEltayef et al (2023, p. 3176).

IWA (2017), *Performance Indicators for Water Supply Services, Manual of Best Practices*. Londres, International Water Association. Tercera Edición.

Jacobo Villa, M.A. y Saborio Fernández, E. (2004) (Coords.), *La Gestión del Agua en México. Los retos para el desarrollo sustentable*, México, D.F., UAM y Miguel Ángel Porrúa.

Jafar, R., Shahrour, I., and Juran, I. (2010), Application of Artificial Neural Networks (ANN) to model the failure of urban water mains, *Mathematical and Computer Modelling* **51** (9-10). 1170-1180, citado por Cantos y Juran (2019, p. 4).

Jardines Moreno, J.L. (2008), “La infraestructura hidráulica municipal y la participación en su creación y operación de los Gobiernos Federal y Estatal”, pp. 89-109, en R. Olivares y R. Sandoval (Coords.), *El Agua Potable en México. Historia Reciente, Actores, Procesos y Propuestas*, México, D.F., ANEAS.

Jiménez, B., Torregrosa, M.L., y Aguilar Aboites, L. (2010) (Eds.), *El Agua en México: cauces y encauces*, México, D.F., Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua

Jiménez Alcaráz, J.J. (2022), “Problemática urbana por falta de planeación”, *Ingeniería Civil*, Núm. 635, octubre, Pp. 8-10.

Juárez del Angel, R. (2024), “Sostenibilidad integral de proyectos de infraestructura en América Latina”, *Ingeniería Civil*, Núm., 649, febrero, pp. 28-32.

Juuti, P., Katko, T., & Vuorinen, H. (2007), “Introoduction to part IV”, p. 509-510, en Peetri Juitti, Tapio Katko & Heikki Vuorinen (eds.), *Environmental History of Water – Global View on Community Water Supply and Sanitation*, London, IWA Publishing.

Karamouz, M. (2022), *Water Systems Analysis, Design, and Planning: Urban Infrastructure*.

Kim, K., Kim, T., Kang, K., and Kon, J (2024), “Optimization of long-term renewal investment plan for drinking water conveyance networks using dynamic programming”, *AQUA. Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **73** (12), 2344 doi: 10.2166/aqua.2024.364

Kim, K., Seo, J., Hyung, J., Kim, T., Kim, J. & Koo, J. (2019), Economic -based approach for predicting optimal water pipe renewal period based on risk and failure rate”, *Environ. Eng. Res.*, **24** (1), 63-73, citado por Kim *et al* (2024, p. 5).

Kingdom, B., Liemberger, R. & Marin, P. (2006), “The challenge of reducing non-revenue water (NRW) in developing countries – How the private sector can help: a look at performance-based service contracting. Water Supply and Sanitation Sector Board”, *Discussion Paper Series* 8, pp. 1-52, citado por AbuEltayef *et al* (2023, p. 3176).

Kleiner, Y. & Rajani, B. (2022), “Economics of inspection and condition assessment of high-consequence water pipeline and assessing its remaining life: Theoretical framework”, *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, **13** (4), 04022041, citado por Kim *et al* (2024, p. 2).

Kleiner, Y. & Rajani, B. (2002), “Forecasting variations and trends in water main breaks”, *J. Infrastruct. Syst.*, **8**, 122-131. Citado por Kim *et al* (2024, p.2).

Kleiner, Y. & Rajani, B. (2001), “Comprehensive review of structural deterioration of water mains: Statistical models”, *Urban Water J.*, **3**(3), 131-150. Citado por Kim *et al* (2024, p.3).

Kristvik, E., Muthanna, M. and Alfredsen, K. (2019), “Assessment of future water availability under climate change, considering scenarios for population growth and ageing infrastructure”, *Journal of Water and Climate Change*, 10.1 doi: 10.2166/wcc.2018.096.

Kristvick, E. and Riisnes, B. (2015), *Hydrological Assessment of Water Resources in Bergen*, MS thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway, citado por Kristvick *et al* (2019, p. 1).

Le Gat, Y., and Eisenbeis, P. (2000), Using maintenance records to forecasts failures in water networks, *Urban Water* **2** (3), 173-181, citado por Cantos y Juran (2019, p. 4).

Liemberger, R. & Wyatt, A. (2019), “Quantifying the global non-revenue water problem, *Water Science and Technology: Water Supply* 19(3), pp. 831-837. <https://doi.org/10.2166/ws.2018.129>, citado por AbuEltayef *et al* (2023, p. 3176).

Lumbroso, D., Davidson, M., and Wetton, M. (2023), “Development of an agent-based model to improve emergency planning for floods and dam failures”, *Journal of Hydroinformatics*, Vol. 25, No. 5, 1610, doi: 10.2166/hydro.2023.194.

Ma, T., Kim, J-S, Jun, Ch., Moon, Y-I., and Moon, H. (2024), “Optimizing urban flood management: enhancing urban drainage system efficiently under extreme rainfall events”, *Journal of Hydroinformatics*, Vo. 26, No. 11, 2704 doi: 10.2166/hydro.2024.067

Mamo, T. (2015), “Risk-based approach to manage aging urban water main infrastructure”, *Journal of Water Supply Research and Technology – AQUA*, 64.3 doi: 10.2166/aqua.2014.052.

Marlow, D.R., Beale, D.J., Burn, S. (2010), “A pathway to a more sustainable water sector sustainability-based asset management”, *Water Sci. Technol.* 61(5), pp. 1245-1255.

Martínez Lagunes, R. (2022), “De las obras hidráulicas a la seguridad hídrica”, *Ingeniería Civil*, Num. 635, pp. 26-29.

Martínez López, B., Arenas Ortiz, I.E., y Domínguez C. (2021), “Sequía 2020-2021: La segunda más severa del registro histórico reciente”, *Boletín del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático*. Disponible en: <https://www.atmosfera.unam.mx/sequia-2020-2021-la-segunda-mas-severa-del-registro-reciente>

Martínez Pérez, A. (2014), “Mantenimiento a la infraestructura hidráulica del Distrito Federal”, *Revista Ingeniería Civil*, Núm. 542, junio, pp. 16-19.

Marzouk, M. & Osama, A. (2017), “Fuzzy-based methodology for integrated infrastructure asset management”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 10(1), pp. 745-759. <https://doi.org/10.2991/ijcis.2017.10.1.50>. Citado por Daulat et al (2024, p. 879)

Méndez Estrada, K.M. (2023), “20 años del análisis del impacto socioeconómico de los desastres”, *Curso Análisis de los Impactos Económicos de los Desastres*, Ciudad de México, CENAPRED, Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/875600/Tema_4_AIED_cf.pdf

Mendoza Tinoco, D., Méndez Delgado, A.V., y Mercado García, A. (2019), “Costos Económicos del Huracán Alex en Nuevo León, México”, *Revista Problemas del Desarrollo*, 198 (50), julio-septiembre, pp. 3-29.

Minaei, A., Abusamra, S., Hajibabaei, M., Savic, D., Zecchin, A.C., Creaco, E. & Sittenfrei. R. (2024), “Optimized phased planning for dynamic rehabilitation of integrated municipal infrastructure”, *AQUA. Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, **73** (7), 1389 doi: 10.2166/aqua.2024.083.

Minaei, A., Hajibabaei, M., Savic, D., Creaco, E. & Sittenfrei. R. (2023), “Optimal rehabilitation planning for aged water distribution mains considering cascading failures of interdependent infrastructure systems”, *Journal of Hydroinformatics*, **25** (5), 2084, doi: 10.2166/hydro.2023.165.

Miranda, J.R. (2022), “La gestión de riesgos en proyectos de infraestructura”, *Ingeniería Civil*, Núm. 633, agosto, Pp. 8- 11

Molinos-Senante, M. (2018), “Urban water management”, *Global Issues in Water Policy* 21, pp. 131-150. https://doi.org/10.1007/978-3-31976702-4_9. Citado por AbuEltayef et al (2023, p. 3177).

Moody's (2024), "Subsoberanos: Estados con poco margen de maniobra ante huracanes", *Moody's Local México, Análisis Sectorial*, 4 de julio.

Mora, L. (2015), "México. Agua que no has de beber: tendencias sobre el uso y disponibilidad hídrica", *Nota de BBVA Research*, 11 de abril. <https://www.bbvaresearch.com/publicaciones/mexico-agua-que-no-has-de-beber-tendencias-sobre-el-uso-y-disponibilidad-hidrica/>

Moreno Pérez, S. (2023). *Infraestructura en México. Avances y Pendientes*, Ciudad de México, Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, Cámara de Diputados, Documento de Trabajo No. 408, junio.

Muñoz Álvarez, R.G. (2022), "Desafíos técnicos, financieros, de gobernanza y gestión en el sector hídrico", *Ingeniería Civil*, Núm. 634, pp. 4-7.

OCDE (2013), *Hacer Posible la Reforma de la Gestión del Agua en México*, OECD Publishing.

OECD (2024a), *Government at a Glance: Latin America and the Caribbean 2024*, OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/4abdba16-en>

OECD (2024b), *Compendium of Good Practices in Quality Infrastructure: Building Resilience to Natural Disasters*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/54d26e88-en>

OECD (2024c), *OECD Economic Surveys: Mexico 2024*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787b8d974db-en>

OECD (2024d), *G20/OECD report on approaches for financing and investment on climate-resilient infrastructure*, OECD Publishing, Paris.

OECD (2019), *Good Governance for Critical Infrastructure Resilience*, OECD Publishing, Paris

OECD/The World Bank/UN Environment (2018), *Financing Climate Futures: Rethinking Infrastructure*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264308114-en>.

OECD (2000), *Frameworks to Measure Sustainable Development: An OECD Expert Workshop*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264180635-en>

Okwori, E., Pericault, Y., Ugarelli, R. Viklander, M. & Hedström, A. (2021), "Data-driven asset management in urban water pipe networks: A proposed conceptual framework.", *Journal of Hydroinformatics*, pp. 1-16. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.068>. Citado por Daulat et al (2024, p. 879).

OLAS (2025). El Observatorio Latinoamericano y del Caribe de Agua y Saneamiento. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://www.iadb.org/es/quienes-somos/topicos/agua-y-saneamiento/iniciativas/olas>

Olivares, R. y Sandoval, R. (2008), *El Agua Potable en México. Historia Reciente, Actores, Procesos, Propuestas*, México, D.F., ANEAS

Orime, H., Tait, S., Boxall, J., Shepherd, W. & Schellart, A. (2024), "Evaluating the Performance of water distribution network deterioration using customer-oriented performance indices", *Water Supply*, **24** (11), 3759 doi: 10.2166/ws.2024.240.

Oswald Spring, U. (2011) (Coord.), *Retos de la investigación del agua en México*, Cuernavaca, CRIM-UNAM

Otzuka, K. (2008), "Comments on "Infrastructure and Development: A Survey of Recent and Upcoming Issues" by Antonio Estache", pp. 87-88, en Bourguignon y B. Pleskovic (eds.), *Annual World Bank Conference on Development Economics – Global 2007. Rethinking Infrastructure for Development*, Washington. D.C, Banco Mundial.

Oving, H., y Boeienga (2018), *Too Big. Rebuild by Design: A Transformative Approach to Climate Change*, Rotterdam, naio10 publishers.

Padilla Ascencio, E. (2016), "Indicadores de servicios de agua y saneamiento", *H2O Gestión del Agua*, Núm. 10/Abril-Junio de 2016.

Parry, M et al. (2009). *Assessing the costs of adaptation to Climate Change: A Review of the UNFCCC and Other Recent Estimates*. Londres, International Institute for Environment and Development y Graham Institute for Climate Change. Citado por Arreguín – Cortés et al (2016a, pp. 8-9).

PEF (2026). *Presupuesto de Egresos de la Federación para el año Fiscal 2026* Cámara de Diputados. DOF 21-11-2025. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/PEF_2026.pdf

PEF (2025). *Presupuesto de Egresos de la Federación para el año Fiscal 2025*. Cámara de Diputados. DOF 24-12-2024. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/pef_2025/PEF_2025_abro.pdf

Pek, E. y Salman, M. (2023), *Enabling pathways for drought finance in agriculture*, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Peña Ramírez, J. (2012), *Crisis del Agua en Monterrey, Guadalajara, San Luis Potosí, León y la Ciudad de México (1950-2010)*, México, D.F., UNAM.

Perera, D., Smakhtin, V., Williams, S., North, T., and Curry, A. (2021), *Ageing Water Storage Infrastructure: An Emerging Global Risks*. UNU-INWEH Report Series, Issue 11, United Nations University, Institute for Water, Environment and Health, Hamilton, Canada.

Perló Cohen, M. y Castro-Reguera Mancera, L (2018), *La crisis del agua y la metrópoli. Alternativas para la Zona Metropolitana del Valle de México*, Ciudad de México, Siglo XXI Editores y Escuela de Administración Pública de la Ciudad de México, Biblioteca Básica de las Metrópolis 04

Peyras, L., Royet, P., and Boissier, D. (2006), “Dam ageing diagnosis and risk analysis: development of methods to support expert judgement”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, No. 2, pp. 169

Provencio, E. y Carabias, J. (2019), “El presupuesto federal de medio ambiente: un trato injustificado y desproporcionado”, *Revista Este País*, No. 336, abril, pp. 18-24.

Prud'homme, R. (2005), “Infrastructure and Development”, pp. 154-180, en F. Bourguignon and , B. Pleskovic (eds.), *Annual Bank Conference on Development Economics 2005. Lessons of Experince*, Washington, D.C., World Bank.

Radvanovsky, R. & McDougall (2024), *Critical Infrastructure. Homeland Security and Emergency Preparedness*, Boca Raton y Abingdon, CRC Press

Raihan, A., Pereira, J., Begum, R.A. & Rasiah, R. (2023), “The economic impact of water supply disruption, from the Selangor River, Malaysia”, *Blue Green Systems* 5(2), 102 doi: 10.2166/bgs.2023.031

Reddy, K. (2021), *Extent of Non-Revenue Water – Training Manual*, Climate Centre for Cities, National Institute of Urban Affairs (NIUA). Disponible en www.niua.org/c-cube, citado por AbuEltayef et al (2023, p. 3176).

Robledo Cabello, L.F. (2023), “Situación actual del agua potable en México”, *Ingeniería Civil*, Núm. 646, octubre, pp. 14-18.

Robledo Cabello, L. (2021), “Los grandes proyectos de infraestructura requieren años de planeación”, *Ingeniería Civil*, Núm. 623, septiembre, Pp. 4-8.

Rodríguez Tirado, J.A. (2021), “Importancia de la operación sostenible de la infraestructura hidráulica”, *Ingeniería Civil*, Núm. 618, abril, Pp. 24-28.

Rozas, P. (2010), “América Latina: problemas y desafíos del financiamiento de la infraestructura”, *Revista CEPAL* 101, agosto, pp. 59-83.

Rozenberg, J. y Fay, M. (2019) (eds), *Beyond the Gap. How Countries Can Afford the Infrastructure They Need while Protecting the Poor*, Washington, D.C., World Bank Group. Disponible en: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31291>.

SADM (2025), “Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica”, Presentación de Servicios de Agua y Drenaje de Monterrey, en Conferencia Internacional Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. México y Perspectivas Internacionales, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, 20 de noviembre.

Sakai, H., Satake, M., Arai, Y., & Takizawa, S. (2020), “Report cards for aging and maintenance assessment of water-supply infrastructure”, *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 69.4 doi: 10.2166/aqua.2020.112.

Sancho y Cervera, J. (1995), “El Agua. Perspectiva de su Aprovechamiento y Conservación en México (Propuesta de Estrategia hacia el Siglo XXI), *Ingeniería Civil*, N0. 312, abril, pp. 9-18.

Sandoval Mineiro, R. (2012), “Gobernanza en los servicios de agua y saneamiento: significado e implicaciones”, *Ingeniería Civil*, Núm. 512, mayo, pp. 20-30

Santillán Doherty, C. (2022), “Consideraciones para planear infraestructura sostenible”, *Ingeniería Civil*, Núm 629, abril, 8-11.

Santos, E.J. (1994), “Roundtable Discussion Critical Issues in Infrastructure in Developing Countries”, *Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics 1993* Washington, D.C., World Bank, pp. 480-483.

Selvakumar, A. and Tafuri, A.N. (2012), “Rehabilitation of Aging Water Infrastructure Systems: Key Challenges and Issues, *Journal of Infrastructure Systems*, vol. 18, pp. 202-209

SEGIAGUA (2025), “Infraestructura Hidráulica de la Ciudad de México”, Presentación de Secretaría de Gestión Integral del Agua (Ciudad de México) en *Conferencia Internacional Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. México y Perspectivas Internacionales*, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, 20 de noviembre.

SEMARNAT (2024). *Atlas digital geográfico*, Ciudad de México, Secretaría de Medio Ambiente y recursos Naturales. Disponible en https://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/atm_climas.html#:~:text=En%20el%20territorio%20nacional%20se,Fr%C3%ADo%20con%20la%20m%C3%ADnima%20superficie

SIAPA (2025), “Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. Área Metropolitana de Guadalajara: Retos y perspectivas”, Presentación de Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Guadalajara en Conferencia Internacional Envejecimiento de la Infraestructura Hidráulica. México y Perspectivas Internacionales, Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, 20 de noviembre.

Sisto, N., Guajardo, R., y Aguilar Barajas, I. (2011), “Estimación de los impactos económicos de una sequía”, *Tecnología y Ciencias del Agua* (Antes Ingeniería Hidráulica en México”, Vol. II, Núm. 2, abril- junio, pp. 111-123. 2011.

SMN (2025). “Información Estadística Climatológica”, Servicio Meteorológico Nacional, Ciudad de México, Conagua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>

Shamir, U., and Howard (1979), “An analytical approach to scheduling pipe replacement.”, *J. Am. Water Works Assoc.*, 71(5). 248-258. Citado por Selvakumar & Tafuri (2012, p. 207)

Shaw, W. D. (2005), *Water Resource Economics and Policy. An Introduction*, Cheltenham and Northampton, Edward Elgar.

Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2022), “Avances en la gestión del agua potable en la CDMX”, *Revista H2O Gestión del agua*, Núm. 32, noviembre, pp. 22-26

Silva Rodríguez de San Miguel, J. A. (2017), “Retos de la gestión del agua potable en la CDMX”, *Revista H2O Gestión del agua*, Núm. 15, julio-septiembre, pp. 18-23

Sisto, N. y Ramírez-Orozco, A. (2018), “Inundaciones repentinas en el área metropolitana de Monterrey”, pp. 143-158 en I Aguilar-Barajas, J. Mählknecht, J. Kaledin, M. Kjellén, y A. Mejía-Betancourt (eds.), *Agua y Ciudades en América Latina. Retos para el desarrollo sostenible*, Washington, D.C. Banco Interamericano de Desarrollo.

Sjöstrand, K., Klinberg, J., Zadeh, N.S., Haraldsson, M., Rosén, L. & Lindhe, A. (2021), “The value of water – estimating water disruption impacts on businesses”, *Water* **13** (11), 1565, citado por Raihan et al (2023, p. 2)

Solis Tapia, A. (2018), “La Utopía de la Infraestructura”, *Obras*, septiembre, pp. 71-72.

Spaniel, D. (2023), *Securing the Nation’s Critical Infrastructures. A Guide for the 2021-2025 Administration*, Boca Raton y Abingdon, CRC Press & The Institute for Critical Infrastructure Technology (ICIT)

Spence, M., Clarke Annez, P., and Buckley, R. M. (2009), *Urbanization and Growth*, Washington. D.C., Commission on Growth and Development, World Bank.

Stewart, M.G., Val, D.V., Bastidas-Arteaga, E., O’Connor, A., & Wang, X. (2024), “Climate Adaptation Engineering and Risk-based Design Management of Infrastructure”, pp. 641-684, en pp. 641-684, Dan M. Frangopol & Yiannis Tsompanakis (eds), *Maintenance and Safety of Aging Infrastructure*, Structures and Infrastructures Serie 10 Abingdon y Boca Raton, CRC Press.

Swatuk, L.A. y L. Wirkus (eds) (2018), *Water, Climate and the Boomerang Effect. Unintentional Consequences for Resource Insecurity*, Abingdon, Routledge

Taiwo, R., Ben-Seghier, M. & Zayed, T. (2023), “Towards sustainable water infrastructure. The state-of-the-art for modelling the failure probability of water pipes”, *Water Resour. Res.* **59** (4), e2022WR033256, Citado por Kim et al (2024, p.2)

Tortajada, C., Guerrero, V., y Sandoval, R. (2004), *Hacia una gestión integral del agua en México. Retos y alternativas*, México, D.F., Cámara de Diputados y Miguel Ángel Porrúa.

Triana, J. (2023), “Fonden: mitos y realidades”, *El Universal*, 28 de octubre.

Tzatchkov, V., Arreguín Cortés, F.I., Saavedra Horita, J.R., Rodríguez Varela, J.M., Cortés Mejía, P.E. Llaguno Gilberto, O.J., y Sainos, A. (2022), “Índice de seguridad hídrica a nivel estatal en México”, *Ingeniería Civil*, Núm. 626, enero, pp. 14-18.

Van Vuren, S., Konings, V., Jansen, T., Van der Vlist, and Smet, K. (2015), “Dealing with Aging Infrastructure: An Approach for Redesign water Infrastructure Network”, *E-proceedings of the 36th IAHR World Congress*, 28 June - 3 July, The Hague, the Netherlands.

Vázquez Contreras, A., Dávila Serrano, M., Acosta Quevedo, R., y Sánchez Pérez, J. (2012), “Análisis de los costos de exploración en seis grandes presas de México”, *Ingeniería Civil*, Núm. 519, pp. 14-18.

Wan-Wendner, R. (2018), “Aging Concrete Structures: A review of mechanics and concepts”, *Journal of Land Management, Food and Environment*, Vo. 69, Num. 3, pp. 175-199.
<https://reference-global.com/download/article/10.2478/boku-2018-0015.pdf>

WEF (2026), *Global Risks Report. Insight Report*. 21st edition, Geneva, World Economic Forum
<https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2026/>

WEF (2025), *Global Risks Report. Insight Report*. 20th edition, Geneva, World Economic Forum.
<https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2025/>

WEF (2024), *Global Risks Report. Insight Report*. 19th edition, Geneva, World Economic Forum.
Disponible en <https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2024/>

WEF (2023), *Global Risks Report 2023. Insight Report*. 18th edition, Geneva, World Economic Forum.
<https://www.weforum.org/publications/global-risks-report-2023/>

Whitt-Vinyard, L. (2023), “Dams. About the Dams Sector”, p. 39 en D. Spaniel (ed.), *Securing the Nation’s Critical Infrastructures. A Guide for the 2021-2025 Administration*, Boca Raton y Abingdon, CRC Press & The Institute for Critical Infrastructure Technology (ICIT)

Winston, C. (1994), “Roundtable Discussion Critical Issues in Infrastructure in Developing Countries”, *Proceedings of the World Bank Annual Conference on Development Economics 1993* Washington, D.C., World Bank, pp. 483-484.

WMO (2018), *Guide to climatological practices. 2018 Edition*. WMO No. 100

Woetzel, J., Garemo, N., Mischke, J., Kamra, P., and Palter, R. (2017), “*Bridging Infrastructure Gaps: Has the World Made Progress?*”, McKinsey Global Institute. Disponible en:
<https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/bridging-global-infrastructure-gaps>

World Bank (2016), *Mexico Public Expenditure Review*, Washington, D.C., World Bank.
Disponible en <https://openknowledge.worldbank.org/entities/publication/eeff281e-a5aa-5949-8335-a8e4a0536dc8>

World Bank (2008), *The Growth Report.- Strategies for Sustained Growth and Inclusive Development*, Washington, D.C., Banco Mundial para la Comisión para el Crecimiento y el

Desarrollo.

<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/6507/449860PUB0Box3101OFFICIAL0USE0ONLY1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

World Bank (2005), *Mexico. Infrastructure Public Expenditure Review (IPER)*, Washington, D.C., Report No. 33483-MX.

Zamarrón-Mieza, I., Yepes, V. y Moreno, J.M. (2017), "A systematic review of application of multi-criteria decision analysis for aging-dam management", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 147, pp. 217-230. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617301051>

Zurich (2019), "Events are natural, disasters are not. How lessons learned from previous events can help businesses to become more resilient", *Risk Insights*, May.