

Seguridad hídrica en México: diagnóstico general y desafíos principales

Water security in Mexico: general diagnosis and main challenges

Martínez-Austria, P.F.^a, Díaz-Delgado, C.^b y Moeller-Chavez, G.^c

^aUniversidad de las Américas Puebla. Director de la Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos. Escuela de Ingeniería. Ex Hacienda Sta. Catarina Mártir s/n San Andrés Cholula. 72810 México. E-mail: polioptro.martinez@udlap.mx.

^bInstituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria, Toluca, Estado de México, 50130, México. E-mail: cdiazd@uaemex.mx

^cUniversidad Politécnica del Estado de Morelos, Directora Académica de Ingeniería en Tecnología Ambiental y Biotecnología. Paseo Cuauhnáhuac 566. Jiutepec, Morelos. 62550 México. E-mail: gmoeller@upemor.edu.mx

Recibido: 07/07/2018

Aceptado: 05/03/2019

Publicado: 30/04/2019

Citar como: Martínez-Austria, P.F., Díaz-Delgado, C., Moeller-Chavez, G. (2019). Water security in Mexico: general diagnosis and main challenges. *Ingeniería del agua*, 23(2), 107-121. <https://doi.org/10.4995/ia.2019.10502>

RESUMEN

La seguridad hídrica debe ser el objetivo estratégico de la política del agua en México. Es respecto de este principio normativo que debe evaluarse la situación actual de los recursos hídricos, en calidad y cantidad, así como de la gestión del agua en práctica. En este texto se elabora un diagnóstico general de la seguridad hídrica en México, así como de los retos que enfrenta ahora y en el futuro cercano. Se analiza la disponibilidad y escasez con un enfoque territorial, así como la condición de los acuíferos, la calidad del agua superficial y subterránea y los usos del agua. Se abordan los principales desafíos para la seguridad hídrica y las tendencias en las fuerzas modeladoras más relevantes. Para atender la problemática descrita, se proponen acciones específicas y, como conclusión general, la necesidad de una reforma del agua en México.

Palabras clave | seguridad hídrica; disponibilidad el agua; calidad del agua; gobernanza del agua; agua y cambio climático.

ABSTRACT

The water security must be the strategic objective of the water policy in Mexico. It is with respect to this normative principle that the current situation of the water resources, in quality and quantity, as well as the water management in practice must be evaluated. In this text, a general diagnosis of water security in Mexico is presented, as well as the main challenges it faces now and in the near future. The water availability and scarcity is analyzed with a territorial approach, as well as the condition of the aquifers, the surface and underground waters quality and the water uses. The main challenges for water security and trends in the most relevant modeling forces are addressed. To address the problems described, specific actions are proposed and, as a general conclusion, the need for a water reform in Mexico is suggested.

Key words | water security; water availability; water quality; water governance; water and climate change.

INTRODUCCIÓN

En un reciente reporte de riesgos globales del Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2017), la crisis del agua aparece como el tercer riesgo global de mayor impacto, y se ubica también entre los riesgos con mayores probabilidades de materializarse. La crisis del agua, además, está asociada con dos riesgos globales mayores: la ocurrencia de eventos climáticos extremos y la falla en la mitigación y adaptación al cambio climático. Estos riesgos, todos ellos de gran impacto y probabilidad de ocurrencia, se retroalimentan entre sí, de manera que la probabilidad o presencia de alguno de ellos aumenta la de los restantes.

En muchos países no se ha alcanzado la seguridad hídrica y, de hecho, ésta se encuentra cada vez más amenazada. El crecimiento poblacional, el desarrollo económico, la urbanización, la variabilidad climática resultado del cambio climático global y el propio deterioro ambiental continúan aumentando la presión sobre los recursos hídricos, de tal manera que se registran ya condiciones de escasez, permanente o recurrente, en algunas regiones. La inadecuada gestión del agua, con frecuencia, agrava esta problemática.

Empleando el Índice de Seguridad Hídrica propuesto por Smakhtin *et al.* (2004), y que considera las necesidades de agua del medio ambiente, Rekecewicz (2006) produjo el mapa de la Figura 1. Como puede observarse, existe un número muy elevado de cuencas grandes en las que el recurso hídrico está sobreexplotado, particularmente en Europa, Norte de África, Medio Oriente, India, China y Norteamérica. En el caso de México, prácticamente todas las cuencas del centro y norte del país, además de la cuenca del río Lerma y Valle de México, tienen niveles de alta explotación o sobreexplotación.

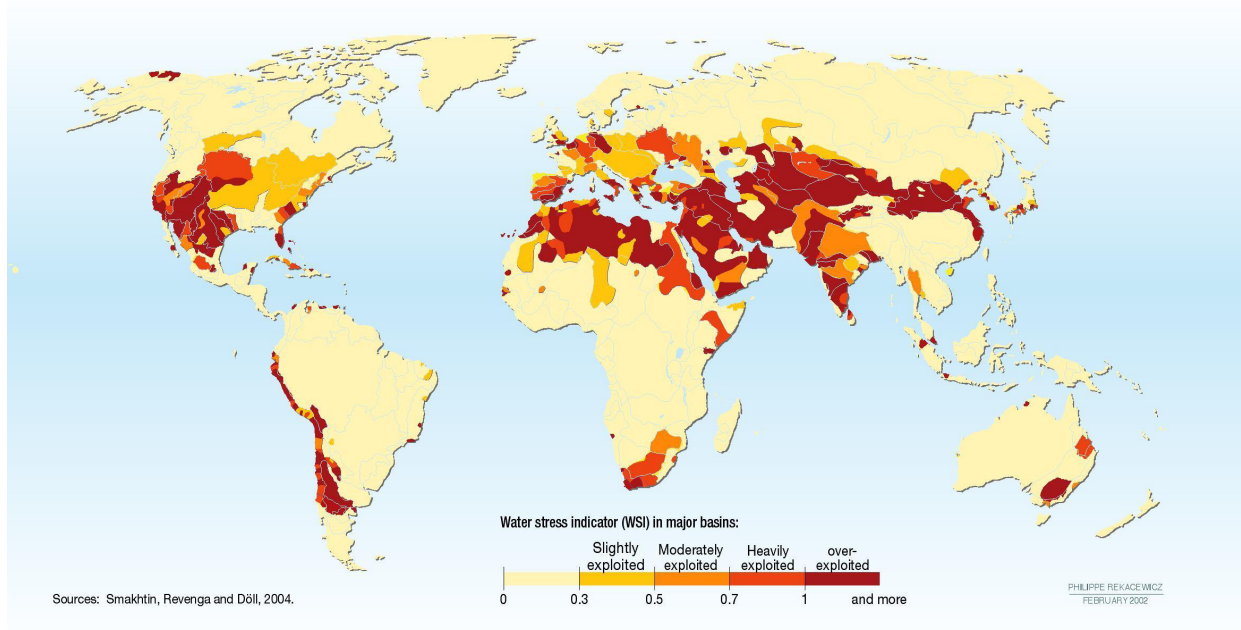


Figura 1 | Índice de Estrés Hídrico en las cuencas mayores del mundo (Rekecewicz, 2006).

SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO

Disponibilidad del agua

Si se consideran solamente los efectos demográficos, de acuerdo con el criterio de estrés hídrico de Falkenmark, para el año 2030 la mayor parte del territorio mexicano se encontrará en condiciones de estrés hídrico (1000 a 1700 $m^3/hab/año$), escasez (500 a 1000 $m^3/hab/año$) o escasez absoluta (<500 $m^3/hab/año$) (véase Figura 2).

Los ríos y arroyos del país constituyen una red hidrográfica de 6.33×10^5 km, en la que destacan 51 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento anual y cuyas cuencas ocupan el 65% del territorio nacional. Por su superficie destacan las cuencas de los ríos Bravo y Balsas y por su longitud los ríos Bravo y Usumacinta. Para el año 2015 el 32.4% de las aguas superficiales fueron clasificadas como contaminadas (26.2%) o fuertemente contaminadas (5.8%) para el indicador de demanda química de oxígeno (DQO) (CONAGUA, 2016). La importación de volúmenes de agua en la frontera sur rebasa los 3.4×10^4 hm³/año y en la frontera norte los 5900 hm³/año. Aquí cabe señalar que, dadas las condiciones de aridez en el norte de México, este volumen de importación es crucial y estratégico para toda la franja fronteriza en aspectos sociales, ambientales y económicos.



Figura 2 | Agua renovable *per cápita* en 2030 (CONAGUA, 2016).

El agua subterránea en México presenta una recarga media anual de 91788 hm³ de los cuales se suministra el 38.9% (33310 hm³/año) del consumo total de agua del país (85660 hm³/año), para todos los usos consuntivos. El agua subterránea se utiliza principalmente para usos consuntivos (32860 hm³/año por año al 2015; CONAGUA, 2016); y específicamente para el riego de cultivos hasta en un tercio de la superficie total irrigada del país (unos 6.5 millones de hectáreas). Más de 71 millones de personas (55 millones en zonas urbanas y 16 millones en zonas rurales) dependen del abastecimiento de agua subterránea (7320 hm³/año). Además, al menos el 50% de las instalaciones industriales auto abastecidas (que toman agua directamente de aguas superficiales o acuíferos) utilizan las aguas subterráneas en sus procesos (2070 hm³/año; CONAGUA, 2016).

Según la estimación del balance hídrico nacional, la Comisión Nacional del Agua identifica bajo la connotación negativa de “acuíferos sobreexplotados” aquéllos donde la explotación excede la recarga anual promedio, y la continuación a largo plazo de esta condición, es probable que produzca efectos negativos reflejados como impactos ambientales. Este tipo de impactos ambientales pueden ser: desecación de humedales; desaparición de manantiales; reducción del flujo de base en ríos; hundimiento de suelos y deterioro de la calidad del agua subterránea, además de un incremento significativo en consumo energético para su aprovechamiento por pozos de bombeo, pudiéndose presentar estas consecuencias aisladas o de forma simultánea.

También suelen surgir problemas sociales y económicos debido a la extracción intensiva de agua, término que parece ser más adecuado para la connotación de “acuífero sobreexplotado”. El territorio mexicano cuenta con 653 acuíferos y el número de acuíferos sobreexplotados ha aumentado de 32 en 1975 a 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 101 en 2008 y 105 para 2015 (CONAGUA, 2016). Entre los 653 acuíferos, 18 presentan problemas por intrusión salina (acuíferos costeros) y 32 están sometidos al fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres, localizados principalmente en la Península de Baja California y el altiplano mexicano, donde coinciden condiciones de baja precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y consecuentemente evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y minerales evaporíticos de fácil disolución (CONAGUA, 2016). Estos cuerpos de agua sobreexplotados están ubicados en el centro, norte y noroeste del país (véase Figura 3), una región semiárida y árida que posee únicamente el 31% del total de agua disponible del país, pero concentra el 77% de la población total de México, e incluye los principales centros de población. El excesivo bombeo de agua subterránea con fines de producción agrícola, industrial y de suministro urbano, está conduciendo a un acelerado proceso de abatimiento de acuíferos, de tal manera que su tasa de recarga

natural ha sido rebasada alcanzando un grado de presión en 8 de 13 Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA) de Alto (número de RHA, superficie y población afectadas: 7 RHA; 1 389 834 km²; 64.64 millones de habitantes) o Muy Alto (número de RHA, superficie y población afectadas: 1 RHA; 180 229 km²; 23.19 millones de habitantes).

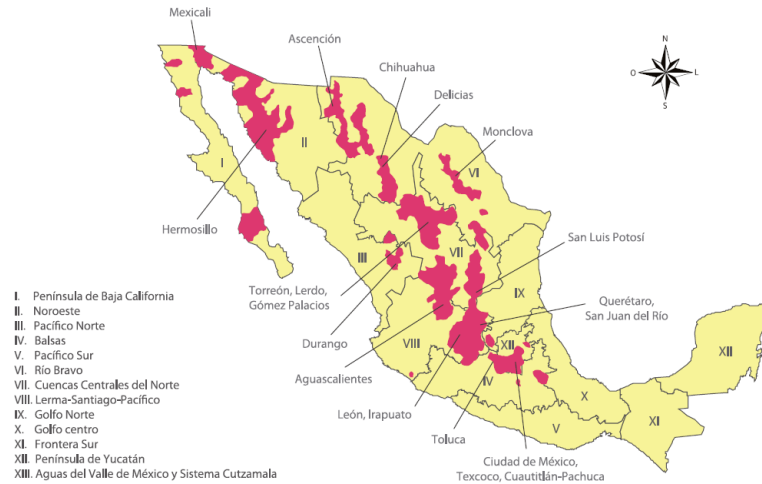


Figura 3 | Acuíferos sobreexplotados en México (en color rojo) y principales centros urbanos (Domínguez Mora, y otros, 2012).

En el caso específico del deterioro de la calidad del agua relacionado con los cambios hidroquímicos, la extracción intensiva de aguas subterráneas favorece procesos como: la intrusión de agua de mar; la mezcla de aguas superficiales con aguas subterráneas; la mezcla con las aguas subterráneas altamente mineralizadas de acuíferos subyacentes o superpuestos o capas confinantes; la propagación lateral de plumas contaminantes y la propagación de contaminantes de fuentes puntuales de superficie, como aguas residuales industriales y municipales sin tratar, a través de fracturas o fallas causadas por subsidencia. Algunos ejemplos de este tipo de deterioro presentes en las aguas subterráneas mexicanas son los acuíferos del Valle de México, Valle de Toluca, Salamanca y San Luis Potosí. Los problemas de calidad del agua subterránea encontrados en dichos acuíferos son diversos, pero pueden dividirse en tres tipos: procesos de salinización causados por una extensa y prolongada irrigación con aguas residuales y aguas subterráneas (sodio, cloruro y sulfato); contaminación antropogénica causada por una protección inadecuada de los acuíferos vulnerables frente a descargas y/o desechos de las actividades turísticas e industriales y la agricultura intensiva (patógenos, nitratos, cloruros, sulfatos, metales pesados, hidrocarburos y compuestos emergentes); y contaminación de origen natural relacionada con la evolución del proceso de oxidación-reducción (pH-Eh) de las aguas subterráneas y disolución de los minerales de las rocas. Si, en el futuro, la explotación intensiva de estos acuíferos continuara, la capa freática no sería restaurada y la calidad del agua subterránea sería inadecuada para muchos usos (para mayores detalles se refiere al lector a Esteller *et al.*, 2012).

Es posible señalar que existen dos orígenes de agua renovable: los ríos y las aguas subterráneas en el primer horizonte de suelo. La capacidad de almacenamiento de los acuíferos es muchas veces mayor que la de los ríos, pero el corto tiempo de residencia del agua en los ríos tiene como resultado una rápida circulación del líquido a través de la red hidrográfica y una reincorporación más dinámica a otras fases del ciclo hidrológico aportándole una característica de renovabilidad de corto plazo. Por esta razón, con respecto al cambio climático, el agua subterránea pareciera ser más resiliente ante los posibles impactos de variabilidad pluvial severa, pues su régimen hídrico es mucho más lento. Sin embargo, esta característica es la que le confiere también una alta vulnerabilidad en el largo plazo por su consecuente lentitud de recuperación de niveles freáticos, agravándose aún más cuando existe explotación intensiva (sobreexplotación), como es el caso de más de cien acuíferos en México.

La producción de energía está relacionada con la seguridad hídrica, de manera estrecha con el agua superficial y en mucho menor grado con el agua subterránea, de hecho, la generación hidroeléctrica no coincide con la localización de acuíferos bajo uso intensivo, por lo que se puede aseverar que los cambios en los acuíferos, al menos en México, no tienen impacto representativo en la producción de energía. Pero sí en el consumo de energía, es decir, en un requerimiento cada vez mayor de energía para la explotación de acuíferos por abatimiento de niveles freáticos, ejemplo de ello es el acuífero del Valle de Toluca el cual ha incrementado, en

promedio, el costo de extracción por cada m³ de agua a la superficie en más de 239% en 2006, considerando un periodo de análisis de 1968 a 2006. Este aumento de requerimiento energético representa un costo adicional anual de cerca de 3 millones de dólares, de acuerdo con los costos de producción para el año 2005 (Fonseca *et al.*, 2013).

Con respecto a la seguridad hídrica y su relación con la seguridad alimentaria, México se encuentra entre los principales importadores a nivel mundial de cárnicos y cereales, destacándose la importación de maíz (Tanigushi *et al.*, 2017). En contraparte, hoy en día México sobresale a nivel mundial por su nivel de exportación de vegetales y frutos, a tal grado que la economía del país ha dejado de depender mayoritariamente de la explotación de petróleo y se soporta significativamente de la exportación de productos agrícolas y del turismo. En otras palabras, ha dejado de exportar petróleo y ahora exporta agua y energía virtuales a través de sus productos agrícolas, industriales o de servicios aunque, como efecto colateral, incrementa la vulnerabilidad de regiones donde el agua subterránea es la principal fuente para la generación de productos de autoconsumo y exportación, a niveles que rebasan en muchos casos su potencial de sustentabilidad.

El abatimiento de acuíferos inducido por prácticas antropogénicas y con fines principalmente económicos, vulnera la sustentabilidad de la ya frágil seguridad hídrica y de alimentos, no sólo en una escala local sino en la escala global a través del comercio internacional. De acuerdo con Dalin *et al.* (2017), con información al año 2010, México extrae un volumen de 11100 hm³/año de agua subterránea dedicada a la irrigación que genera abatimiento de acuíferos, aproximadamente un tercio del total de agua subterránea dedicada a la irrigación. De esta producción agrícola, irrigada con un volumen de agua subterránea no renovable, exporta el 23% y su complemento (77%) es dedicado al consumo nacional. Países como Estados Unidos, Pakistán, Italia y México aparentemente se ven beneficiados por el ingreso de divisas al exportar productos agrícolas, pero esto no es viable en el mediano-largo plazo dado que dicha producción se ha generado a costo de una explotación insostenible de sus acuíferos y con ello generando un pasivo ambiental de grandes proporciones que, comparándole con los ingresos obtenidos, es varias veces superior. Por otro lado, los países importadores (o las regiones al interior de un país), que aparentemente hacen ahorros de volúmenes hídricos, estarán también expuestos a riesgos de sustentabilidad en su seguridad alimentaria y son corresponsables del deterioro ambiental y reducción de disponibilidad de agua y la seguridad hídrica de su socio comercial correspondiente.

En la mayor parte del territorio mexicano, debido a su condición climática, existe una alta variabilidad en la precipitación, tanto en el ciclo anual (lluvias de verano) como interanualmente, con periodos de intensas precipitaciones y/o sequías. En consecuencia, se ha construido un número muy elevado de obras almacenamiento. Se estima que en México existen más de 5000 presas y bordos, con un almacenamiento total aproximado de 150 000 hm³. Es de observar que en sólo 180 grandes presas se concentra el 82% del almacenamiento total, las cuales están dedicadas principalmente al riego y la generación de energía (CONAGUA, 2018).

Servicios de agua

En lo que se refiere a los usos del agua, la mayor parte del agua extraída, el 76.3% se utiliza en la agricultura, el 14.6% en abastecimiento público, el 4.8% en la generación de energía y el 4.3% en la industria autoabastecida¹.

En México existen 85 distritos de riego, con una superficie total de 3.5 millones de hectáreas, y alrededor de 40000 unidades de riego con una superficie de 3 millones de hectáreas, parte de las cuales se siembran en dobles ciclos de cultivo. No obstante, debido a razones diversas, entre ellas la escasez de agua, raramente se siembra y cosecha la superficie total de 6.5 millones de hectáreas. La superficie sembrada de un año a otro depende en gran medida de las condiciones climáticas, y se reduce considerablemente durante los periodos de sequía.

La eficiencia del uso del agua de riego en los distritos de riego de México es precaria. En efecto, la eficiencia media de conducción es de 64.7%, la de conducción interparcelaria de 75% y la de aplicación en parcela del 70%, lo que conduce a una eficiencia global de apenas 34.9% (Peña-Peña, 2007). Es decir, se pierde en promedio el 65.1% del agua extraída de las fuentes para este fin. Evidentemente, la mejora en la eficiencia de riego es una de las mayores áreas de oportunidad para incrementar la seguridad hídrica y resiliencia ante cambio climático.

¹ La industria autoabastecida es aquella que cuenta con concesiones de agua. Una parte de la industria se abastece de la red de los organismos operadores municipales.

Con respecto a la cobertura nacional de agua potable, en 2010 resultó, de acuerdo con la CONAGUA, en 95.59% en zonas urbanas y 75.69% en zonas rurales, para un promedio nacional de 90.94%. Sin embargo, la cobertura es muy heterogénea entre los municipios de México, siendo aquellos municipios con mayor grado de pobreza donde la cobertura se encuentra en el rango inferior a 60%, lo que incluye grandes superficies de los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Veracruz, Oaxaca y Guerrero (ver Figura 4).

Si bien la cifra global de cobertura parece indicar una adecuada cobertura del servicio, en realidad refleja la cantidad de infraestructura, pero la calidad del servicio deja mucho que desear. En la declaración final de misión del Relator Especial sobre los Derechos Humanos al Agua y al Saneamiento, se señala que:

Funcionarios a menudo me reportaron estadísticas de que 94% de la población mexicana tiene acceso al agua potable y 93% al saneamiento. Sin embargo, es importante subrayar que dichas cifras, si bien son impresionantes, sólo reflejan la existencia de alguna forma de infraestructura y definitivamente no se traducen en acceso real al agua y al saneamiento, que es dramáticamente inferior (Heller, 2017).

Lo anterior se ratifica si se analizan los resultados del Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores, que revela que, en 2015, en una muestra de 133 organismos operadores de un total de más de 2400 en el país, el porcentaje de tomas que cuentan con servicio continuo es de 74% (Saavedra Horita, Rodríguez Varela, & Hansen Rodríguez, 2016). Es de observar que la muestra no es aleatoria, sino de organismos operadores que reportan datos voluntariamente, y son presumiblemente los de mejor desempeño.

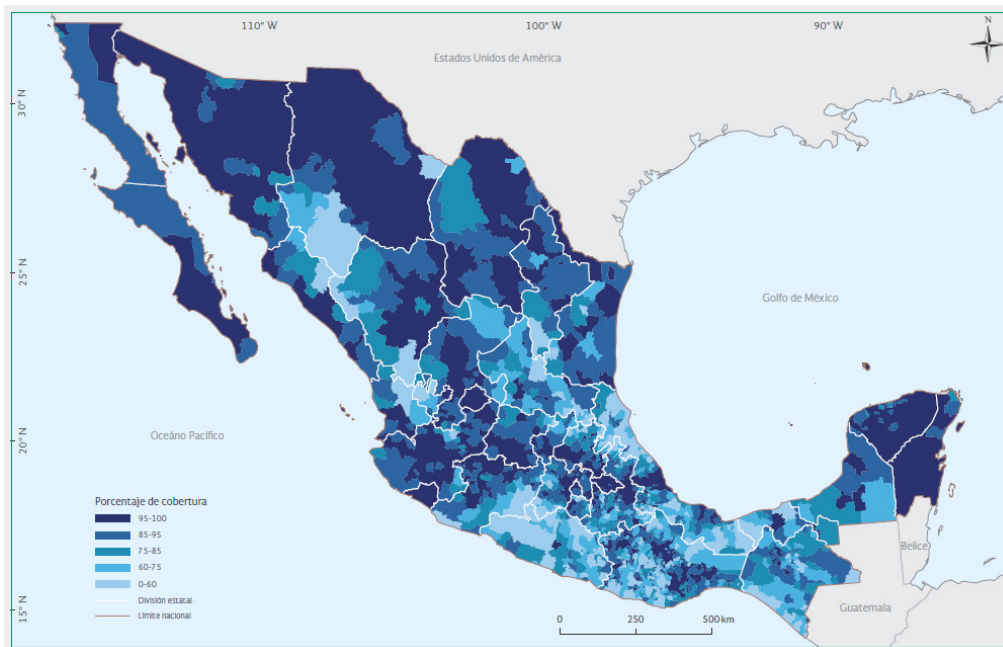


Figura 4 | Cobertura de agua potable por municipio 2010 (CONAGUA, 2016).

Calidad del agua

La red de monitoreo de la calidad del agua, a cargo de la Comisión Nacional del Agua, cuenta con 5000 puntos de monitoreo distribuidos en 6 redes: aguas superficiales, aguas subterráneas, estudios especiales, zonas costeras, descargas superficiales y descargas subterráneas. La red de aguas superficiales, que es la de interés directo para determinar el estado de los ríos, lagos y vasos, está constituida por 2514 puntos de monitoreo (CONAGUA, 2016).

CONAGUA reporta que la evaluación de la calidad del agua se realiza a través de tres parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Se espera que la DBO_5 sea un indicador de la contaminación de origen orgánico biodegradable, tales como descargas de aguas residuales de origen urbano y doméstico; y la DQO un indicador de la contaminación de origen industrial orgánico e inorgánico no biodegradable. Los intervalos de concentración de estos dos parámetros que la CONAGUA considera para los diferentes grados de contaminación se muestran en la Tabla 1. Con estos criterios y los datos de monitoreo, esta dependencia obtiene los mapas de calidad reportados en sus Estadísticas del Agua en México. (CONAGUA, 2016).

Tabla 1 | Indicadores y rangos de calidad del agua empleados por la CONAGUA (Tomados de CONAGUA, 2016b).

DQO (mg/l)	DBO_5 (Mg/l)	Estado del cuerpo de agua
$DQO \leq 10$	$DBO_5 \leq 3$	Excelente
$10 < DQO \leq 20$	$3 < DBO_5 \leq 6$	Buena calidad
$20 < DQO \leq 40$	$6 < DBO_5 \leq 30$	Aceptable
$40 < DQO \leq 200$	$30 < DBO_5 \leq 120$	Contaminada
$DQO > 200$	$DBO_5 \geq 120$	Fuertemente contaminada

Estos indicadores exhiben al menos dos problemas importantes: no toman en cuenta la existencia de múltiples contaminantes que, aún en cantidades pequeñas, son nocivos para la salud y/o el medio ambiente; y son demasiado laxos al declarar que la condición cualitativa del cuerpo de agua (de excelente a fuertemente contaminada) sea suficiente. Al respecto, el número de parámetros empleados en México como índices de calidad del agua, no está acorde con las mejores prácticas internacionales. De hecho, hasta 1999 la Comisión Nacional del Agua recomendaba calcular un índice de calidad del agua (ICA) empleando un promedio ponderado de 18 parámetros, en lugar de los tres que hoy se emplean. En la Tabla 2 se muestra una comparación de los índices de calidad usados hasta 1999 en México, con los que se emplean en los Estados Unidos de América y la Unión Europea. En esta tabla, el ICA-NSF es empleado por la National Sanitation Foundation; el ICA-Dinius considera cinco usos del agua; DQWI, es el *Drinking Water Quality Index* y, finalmente, el UWQI, *Universal Water Quality Index* que es empleado en la Unión Europea. (Pérez-Flores et al., 2014).

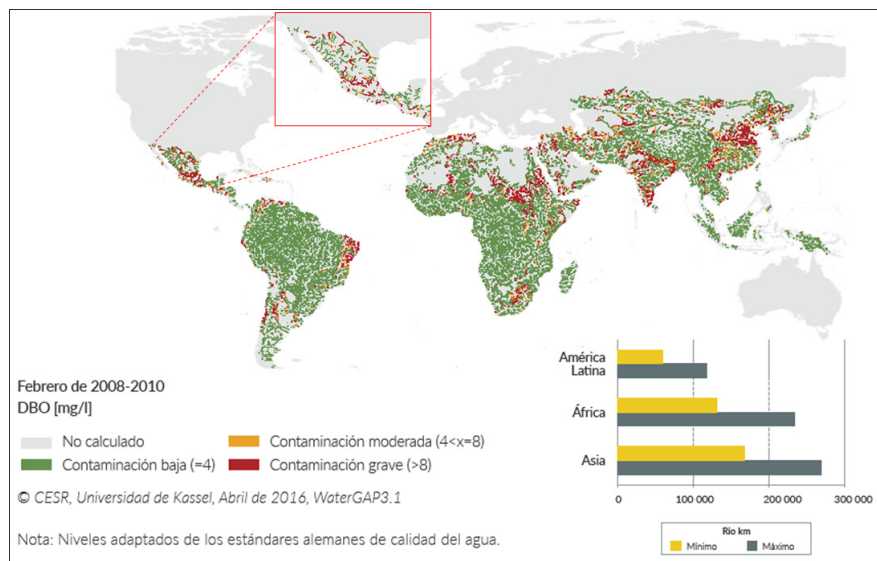
Como puede observarse, los indicadores usados actualmente en México (tabla 1) sólo dan una idea cualitativa, y optimista, de la calidad del agua, y ello sin considerar la insuficiente frecuencia del monitoreo. Puede darse el caso, y de hecho ha ocurrido, que aguas contaminadas por algún metal, como plomo o arsénico, sean consideradas de buena calidad, cuando de facto son un riesgo para la salud. Cuando se emplea un criterio más estricto, emerge un panorama de la calidad del agua muy distinto. En la figura 5 se presenta el análisis publicado por UNESCO (WWAP, Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas, 2017) de la situación de la calidad del agua en el mundo, en la que, como puede observarse, al aplicar un criterio internacional de contaminación basado en la DBO_5 , muchos de los ríos en México se muestran con contaminación grave. Lo mismo sucede con las densidades de coliformes fecales para los cuerpos de agua superficiales (WWAP, 2017) reportados. La situación de contaminación actual de los cuerpos de agua en México, es debida tanto al bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en México, como al bajo nivel de tratamiento exigido.

Es evidente que, mientras mayor sea la demanda de agua, la generación de aguas residuales será cada vez mayor. Uno de los mayores desafíos hídricos en muchos países del planeta y en México es la calidad del agua, que se encuentra aunada a la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales. Las Naciones Unidas, en su informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos, menciona la gran preocupación que generan las descargas de aguas residuales de todo tipo y su bajo nivel de tratamiento, con consecuencias perjudiciales para la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos ambientales de agua dulce y los ecosistemas. De alta preocupación son las descargas de aguas residuales industriales (WWAP, 2017).

Tabla 2 | Comparación de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos empleados por diferentes índices de calidad del agua.

País	México (1992)		Estados Unidos		Unión Europea
Índice	ICA	ICA-NSF	ICA Dinius	DQWI	UWQI
Parámetro					
OD	x	x	x		x
pH	x	x	x	x	x
DBO	x	x	x		x
Nitratos	x	x	x	x	x
Coliformes fecales	x	x	x		
Temperatura		x	x		
Turbiedad	x	x			
Sólidos disueltos totales	x	x			
Fósforo total	x				x
Cadmio				x	x
Mercurio				x	x
Conductividad	x		x		
Sólidos suspendidos	x				
Color	x		x		
Nitrógeno total	x				
Cloruros	x		x	x	
Plomo				x	
Cromo total				x	
Arsénico				x	x

De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016b), del total de agua residual generada se colecta el 91.5%, lo que se traduce en un caudal de 212 m³/s, de aguas residuales municipales, del cual se tratan 120.9 m³/s, es decir el 57%. Esto significa que, del total de aguas residuales generadas, se da tratamiento solamente al 52%, suponiendo que el tratamiento sea el adecuado y se cumpla con la normatividad vigente para descarga y no altere al cuerpo receptor o que cumpla con la calidad para una determinada reutilización. En relación con las aguas residuales industriales, la cobertura de tratamiento es aún menor.

**Figura 5** | Estimaciones de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en cursos de agua. Resaltado de México por los autores (WWAP, 2017).

En el año 2015, la industria trató 70.5 m³/s de aguas residuales, en 2832 plantas en operación a nivel nacional. La Tabla 3 ilustra los principales niveles de tratamiento utilizados a nivel industrial. Como se puede observar, muchos sistemas de tratamiento sólo implementan tratamientos primarios y secundarios, siendo estos niveles insuficientes pues quedan sin remoción una serie de compuestos recalcitrantes, y no normados en este momento (plaguicidas, fármacos, antibióticos, etc.), genéricamente denominados como contaminantes emergentes.

Por otra parte, de acuerdo con reportes del INEGI, solo 34% de los 2457 municipios y delegaciones del país, cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales (INEGI, 2017). La mayor parte de las descargas de aguas residuales sin tratamiento se realizan en ríos y arroyos, canales y en el suelo o barrancas. Como resultado, los cuerpos de agua en México tienen una muy baja calidad, no sólo considerando los parámetros básicos con los que la CONAGUA clasifica la calidad de los cuerpos de agua, sino muchos otros parámetros no normados y procedentes de descargas de aguas industriales o de drenajes agrícolas, como se ha mencionado antes.

Tabla 3 | Principales procesos de tratamiento para las aguas residuales industriales (CONAGUA,2018).

Tipo de tratamiento	Propósito	Número de plantas	Gasto de operación (m ³ /s)	Porcentaje
Primario	Ajustar el pH y remover materiales orgánicos y/o inorgánicos en suspensión con tamaño igual o mayor a 0.1 mm	913	27.65	39.2
Secundario	Remover materiales orgánicos coloidales y disueltos	1660	35.37	50.2
Terciario	Remover materiales disueltos que incluyen gases, sustancias orgánicas naturales y sintéticas, iones, bacterias y virus	85	1.47	2.1
No especificado		174	6.02	8.5
	Total	2832	70.50	100.0

Es necesario ampliar la red de monitoreo, tanto en aspectos de cantidad como de calidad, a fin de mejorar la conservación de los sistemas hidrológicos (cuencas y acuíferos), y es impostergable la revisión de las normas de descarga de aguas residuales tratadas pues, a pesar del incremento en el número de plantas de tratamiento, no se ha mejorado la calidad de los cuerpos de agua. En este aspecto, son necesarios mejores indicadores de calidad del agua y su estricto cumplimiento. Asimismo, sin duda son indispensables estudios locales sobre vulnerabilidad al cambio climático, con las consecuentes acciones de adaptación e incremento de la resiliencia.

Ecosistemas acuáticos

De acuerdo con Garrido *et al.* (2010), en México se desconoce el nivel de alteración ecohidrológica de los ríos. Estos autores, con una metodología indirecta, determinaron que el 73% de los ríos en México presentan niveles de alteración entre medio y muy alto. En especial “cinco de los ríos más caudalosos de México se encuentran dentro de las categorías más elevadas de alteración: el Río Balsas, el Río Santiago, el Río Pánuco (muy alta alteración), el Grijalva-Usumacinta y el Río Papaloapan (Alta Alteración) (Garrido Pérez *et al.*, 2010)”.

Por otra parte, uno de los principales riesgos para los ecosistemas fluviales es el uso excesivo de las corrientes. En México, a pesar de diferentes estudios y opiniones de investigadores y organizaciones civiles (García Rodríguez *et al.*, 1999; Eguía Liz, Gómez Balandra y Saldaña Fabela, 2007), no ha sido posible la introducción de una normativa que obligue a mantener un mínimo caudal ecológico. De esta manera, y tras numerosas presiones de académicos y ecologistas, solamente se ha emitido una norma de caudal ecológico de carácter voluntario (Secretaría de Economía, 2012). Sobra decir que se aplica muy raramente, y en la mayor parte de las corrientes, el volumen disponible se ha concesionado completamente.

Mención especial merecen los ríos urbanos, muchos de los cuales han sido entubados, eliminando su cauce natural y que, con el paso del tiempo, se han convertido en drenajes de aguas residuales. Tal es el caso de la mayoría de los ríos en el valle de México, por ejemplo (i.e. Aguilar Barajas *et al.*, 2015). Otros ríos urbanos se encuentran gravemente contaminados, lo que los ha

convertido incluso en riesgos para la salud humana. Pueden citarse como ejemplos los ríos Atoyac, en el estado de Puebla, y el río Lerma, en el Estado de México (Sandoval Villasana *et al.*, 2009; Greenpeace, 2014).

RETOS DE LA SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO

En la Figura 6 se muestran, de manera esquemática, los principales retos para alcanzar la seguridad hídrica. Estos desafíos se manifiestan principalmente en la escasez de agua, el deterioro ambiental de cuencas y acuíferos, la contaminación de los cuerpos de agua, los efectos adversos de los eventos hidrometeorológicos extremos y los crecientes conflictos por el agua.



Figura 6 | Retos de la seguridad hídrica y principales factores desencadenantes (adaptado de Martínez-Austria P. F., 2013).

Los factores principales que inducen o incrementan estos riesgos para la seguridad hídrica son: los procesos demográficos, que incluyen el crecimiento de la población y la urbanización; la necesidad de una mayor producción de alimentos, resultado de la creciente demanda de alimentos ocasionada tanto por crecimiento demográfico como por cambios en la dieta; la mayor demanda de agua para producción de energía, los efectos del cambio climático y la deficiente gestión del agua. A continuación, se revisarán los más relevantes de entre estos factores desencadenantes.

Factores demográficos

La población mundial, hacia el año 2050, será de 9550 millones de personas, es decir 3423 más que al inicio del siglo. Este incremento, por sí sólo, aumentará sustancialmente las necesidades hídricas de la sociedad, no sólo para el uso directo humano, sino también para la producción de alimentos, energía, servicios y usos industriales. En el caso de México, la población estimada en 2050 será de 143.925 millones de personas, esto es 43.965 millones de personas más que al inicio del siglo XXI (United Nations, 2011). Por otra parte, el proceso de urbanización, que se ha estabilizado en los países desarrollados, continuará en los países en

desarrollo, como prevé la División de Población de las Naciones Unidas. La proporción de la población mundial que habita en zonas urbanas se incrementará notablemente, pasando de 46.6% en el año 2000 a 66.4% en el año 2050.

En el caso de México, la proporción de la población urbana ya era muy alta en el año 2000, 74.7%, 77% para 2015 y continuará creciendo hasta alcanzar el 86.4% en el año 2050. Esta nueva población urbana en México, adicionalmente, se asentará en su mayoría en colindancia con los principales centros urbanos. De las 186 316 localidades actualmente existentes en México, el 48% de la población se ubica en 65 centros urbanos. Sin embargo, en solamente 36 localidades se ubica el 28% de la población. Esta tendencia continuará aumentando. Los principales problemas, que ya se observan y se verán agravados, se encuentran en las grandes ciudades y megalópolis, principalmente las de la ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla.

Gobernanza del Agua

Tabla 4 | Brechas de gobernanza multinivel en el sector agua en México (OCDE, 2013).

Tipo	Descripción y ejemplos
Brecha administrativa	Desajuste entre unidades administrativas y funcionales (entidades de gestión del agua, municipios, áreas metropolitanas, regiones, estados) y fronteras hidrológicas e imperativas.
Brecha de información	Información asimétrica entre partes interesadas, estandarización limitada, REPGA y sistema de monitoreo incompleto, divulgación pública y armonización de los intereses clave.
Brecha de políticas	Políticas de agua, energía, agricultura y desarrollo territorial desalineadas. Tareas de planeación y capacitación fragmentadas.
Brecha de capacidades	Rotación alta de profesionales de agua, programas de entrenamiento/capacitación limitados para personal técnico, administrativo y directivos ² .
Brecha de financiamiento	Ingresos propios muy limitados a nivel subnacional. Gran dependencia de programas federales y de los recursos de CONAGUA.
Brecha de objetivos	Falta de continuidad/convergencia de políticas públicas a nivel subnacional por causa de mandatos políticos limitados (mandato de tres años de alcaldes), motivaciones contradictorias entre consejos y organismos de cuenca.
Brecha de rendición de cuentas	Participación/compromiso limitado de las partes interesadas de la gestión de los recursos hídricos (agricultores y comunidades indígenas) y de los servicios de agua y saneamiento (usuarios y consumidores); mecanismos oficiales limitados para canalizar la demanda.

Uno de los factores desencadenantes de la inseguridad hídrica es la débil y frágil gobernanza del agua. La gobernanza hídrica supone la existencia de políticas públicas claras, un marco jurídico adecuado, así como sistemas de participación social e instituciones apropiadas y con las capacidades necesarias. Supone también la coordinación entre los diversos actores y en los diferentes ámbitos territoriales, un concepto que la OCDE traduce como “governabilidad multinivel”.

La OCDE propone analizar la situación política administrativa en la que está inmersa la gestión del agua, a través de la gobernanza multinivel (OECD, 2011). Asimismo, mediante el Análisis de Brechas, ofrece a los tomadores de decisiones y a los diseñadores de políticas una metodología que posibilita la identificación de deficiencias -brechas- de implementación, mediante el análisis de grandes temas clave que, desde la óptica del analista, deben considerarse para mejorar la gestión del agua.

Con esta metodología, la OECD define los principales retos para la gobernanza hídrica. Entre ellos, los más significativos para México son la brecha fiscal, es decir la divergencia entre las responsabilidades de los actores públicos y los recursos disponibles; la fragmentación de responsabilidades entre los diversos niveles de gobierno (brecha política); falta de incentivos institucionales para la coordinación horizontal y vertical, así como brechas importantes de información. Mención especial merece la brecha de rendición de cuentas, que se manifiesta en la falta de reportes de la acción pública y la carencia de mecanismos políticos y sociales de supervisión. Estas brechas se muestran en la tabla 4 y no requieren mayor comentario, pues son suficientemente explícitas (OECD, 2013).

² Además de la insuficiencia de capital humano especializado en el área.

Cambio climático

Los escenarios más actualizados de cambio climático pronostican incrementos muy importantes de la temperatura en México. De acuerdo con el escenario RCP 6.0, la temperatura media aumentará entre 2 y 4 °C, mientras que, en el escenario RCP 8.5, el aumento será de entre 3 y 5.5 °C, ambos para el periodo 2075-2099 (INECC, 2016). Estos cambios en la temperatura media tendrán grandes efectos en los recursos hídricos, incrementando la cantidad y modificando la distribución temporal de la demanda hídrica tanto del medio ambiente como de los usos agrícola y urbano, principalmente. La agricultura es extremadamente sensible tanto a la variabilidad climática como al cambio climático, por lo que estas alteraciones climáticas mensuales y anuales repercutirán en impactos adversos en la agricultura y reducirá significativamente la resiliencia de la seguridad alimentaria (Cammarano & Tian, 2018; Paredes-Tavares *et al.*, 2018). Desde luego, no son solamente importantes los cambios anuales, sino los que ocurrirán en los diversos meses del año: un incremento de 4 °C en la temperatura media de agosto, como se espera en el escenario RCP 6.0, tendrá significativos efectos en la salud humana, debido a que este es el mes más caluroso del año.

Los cambios esperados en la precipitación son de una disminución en todo el territorio mexicano. En el escenario más desfavorable, RCP 6.0, son de esperar reducciones de entre 16 y 25% en la zona norte del país, y hasta 40% en algunas zonas del noroeste, en la que se encuentra la mayor superficie de riego en México (ver Figura 7, elaborada con datos de INECC, 2016). El efecto combinado de una menor precipitación, que disminuirá en una proporción aún más significativa la disponibilidad natural superficial y subterránea, y de una mayor demanda de agua ocasionada por el aumento en la temperatura, producirá un mayor desbalance y escasez de agua, principalmente en las regiones donde ésta ya ocurre, y se suma a los efectos del crecimiento poblacional y la urbanización.

Por otra parte, en una atmósfera y un océano con mayor energía, son de esperar fenómenos extremos más intensos, principalmente ondas de calor más frecuentes con máximos mayores y de mayor duración, precipitaciones extremas o sequías con mayor recurrencia e intensidad y tormentas de mayor intensidad que desencadenarán graves efectos en la salud humana (Moeller, 2014). Como es del dominio público, México sufre año con año por los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Entre los más recientes, una sequía de más de dos años de duración en el norte de México en el periodo 2011-2013, e inundaciones catastróficas en el centro y sur de México, en ambos litorales, en septiembre de 2013. Desafortunadamente, las pérdidas humanas son cada vez mayores, así como las pérdidas económicas, que alcanzan ya decenas de miles de millones de pesos anuales, sin contar los efectos nocivos del retraso al desarrollo económico y social de muchas regiones. En la Figura 8 se muestran la tendencia observada entre los años 2000-2016.

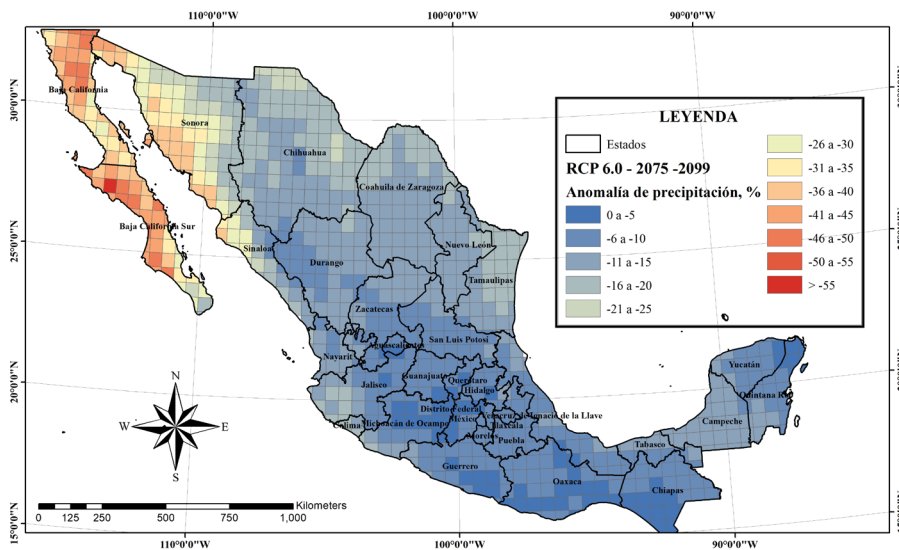


Figura 7 | Cambios esperados en la precipitación. Escenario RCP 6.0, 2075-2099 (Elaborada con datos de INECC, 2016)

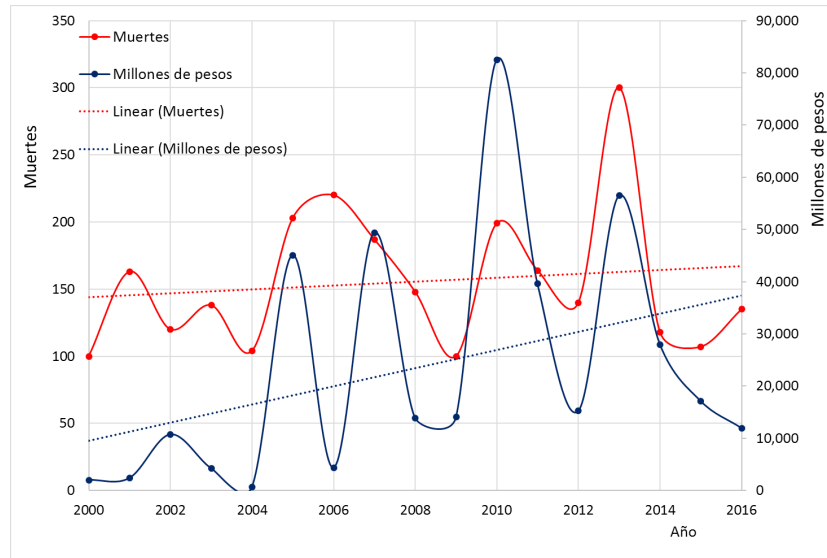


Figura 8 | Tendencias en el número de muertes y costo de desastres naturales relacionados con fenómenos hidrometeorológicos extremos (Elaborada con datos del Centro Nacional de Desastres, México).

CONCLUSIONES

A pesar de los avances en infraestructura de abastecimiento, tratamiento de aguas y reducción de riesgos; de lo expuesto en este texto, se concluye la necesidad de una profunda reforma del sector hídrico en México, que debe abarcar aspectos de gobernanza, en particular legales e institucionales, financiamiento del sector, formación de capital humano, nuevas obras ambientalmente amigables. Debe incluir la modificación de políticas públicas que, pese a las inversiones realizadas, no han sido capaces de detener y revertir la tendencia a una menor seguridad hídrica en México. Esta reforma debe ser discutida y acordada socialmente, no obstante, se pueden señalar algunas medidas necesarias y urgentes. Los escenarios futuros, descritos en este texto en términos de desafíos a la seguridad hídrica, indican que, si no se toman medidas urgentes, la escasez del agua y el deterioro de los recursos hídricos irá en aumento.

Es necesario ampliar la red de monitoreo, tanto en aspectos de cantidad y de calidad, a fin de mejorar la conservación de los sistemas hidrológicos (cuencas y acuíferos), pero sobre todo el empleo de esta información en la toma de decisiones. Es urgente la revisión de las normas de descarga de aguas residuales tratadas pues, a pesar del incremento en el número de plantas de tratamiento, no se ha mejorado la calidad de los cuerpos de agua. En este aspecto, son necesarios mejores indicadores de calidad del agua.

Es impostergable revisar, mejorar y hacer operativos los sistemas de participación pública en la toma de decisiones, para ello, será necesario que la información del agua en México esté efectivamente disponible a todos los usuarios, con un nivel apropiado de difusión.

En materia de abastecimiento de agua potable y saneamiento, es urgente la revisión de las políticas de tarifas y subsidios, que han conducido a la mayoría de los organismos operadores a una situación precaria, en la que difícilmente se cubren los costos de operación, y no son posibles las inversiones necesarias en ampliación y conservación de las obras. Específicamente, se destaca la ausencia de un ente regulador autónomo e independiente del gobierno que regule, audite y supervise los servicios de suministro de agua y saneamiento, con atribuciones para condicionar el financiamiento de los municipios con base en el cumplimiento de indicadores de rendimiento en calidad y cantidad así como en transparencia y rendición de cuentas. La eficiencia en el uso del agua en la agricultura es precaria, por lo que uno de los retos más importantes del país es incrementar la producción de alimentos reduciendo la sobreexplotación de los cuerpos de agua, lo cual puede lograrse con la introducción de tecnologías apropiadas, reutilización del agua, capacitación y un mayor control de las asignaciones para riego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Paul Hernández Moreno, candidato a Doctor en Ciencias del Agua por la Universidad de las Américas Puebla, por la elaboración de la figura 7.

REFERENCIAS

- Aguilar Barajas, I., Mahlknecht, J., Kaledin, J., Kjellén, M., Mejía Betancourt, A. (2015). *Agua y Ciudades en América Latina*. Routledge, BID. 267 pp. ISBN 980-1-315-84844-0.
- Cammarano, D., Tian, D. (2018). The effects of projected climate and climate extremes on a winter and summer crop in the southeast USA. *Agric. For. Meteorol.*, 248, 109-118. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.09.007>
- CONAGUA. (2011). *Agenda del Agua 2030*. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). *Atlas del Agua en México 2016*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016b). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. Edición 2016. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2018. Comisión Nacional del Agua. Ciudad de México. 303 pp.
- Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700-717. <https://doi.org/10.1038/nature21403>
- Domínguez Mora, R., Jiménez Cisneros, B., Kaufer, M., Martínez-Austria, P., Montesillo Cedillo, J., Palerm Viqueira, J., Zapata Martelo, E. (2012). Los recursos hídricos de México. Situación y Perspectivas. En B. Jiménez Cisneros, & J. Galizia Tundisi (Eds.), *Diagnóstico del Agua en las Américas*, 309-357. México: Academia Mexicana de Ciencias.
- Eguía Lis, P.A., Gómez Balandra, M. A., Saldaña Fabela, P. (2007). *Requerimientos para implementar el caudal ambiental en México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, WWF y UNESCO-PHI. 172 pp. ISBN 978-968-5536-96-7.
- Esteller, M., Rodríguez, M., Cardona, A., & Padilla-Sánchez, L. (2012). Evaluation of environmental changes due to intensive aquifer overexploitation: case studies from Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 184, 5725-5741. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2376-0>
- Fonseca, C.R., Esteller, M.V., & Díaz-Delgado, C. (2013). Territorial approach to increased energy consumption of water extraction from depletion of a highlands Mexican aquifer. *Journal of environmental management*, 128, 920-930. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.042>
- García Rodríguez, E., González Villela, R., Martínez-Austria, P., Athala Molano, J., Paz Soldán, G.A. (1999). *Guía de aplicación de los métodos de cálculo de caudales de reserva ecológicos en México*. Colección Manuales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 190 páginas. ISBN 968-7417-30-7
- Garrido Pérez, A., Cuevas, M.L., Cotler, H., González, D.I., & Tharme, R. (2010). Evaluación del grado de alteración hidroecológica de los ríos y corrientes superficiales de México. *Investigación Ambiental*, 2(1), 25-46.
- Greenpeace. (2014). *Ríos Tóxicos: Lerma y Atoyac*. La historia de la negligencia continúa. Greenpeace México A.C. Disponible en <https://www.greenpeace.org/archive-mexico/es/>.
- Heller, L. (2017). *Declaración final del relator especial sobre los derechos humanos al agua y saneamiento*. Oficina del Alto Comisionado de los derechos Humanos. Naciones Unidas. Obtenido de http://www.hchr.org.mx/index.php?option=com_k2&view=item&id=967:declaracion-de-final-de-mision-del-relator-especial-sobre-los-derechos-humanos-al-agua-y-al-saneamiento-sr-leo-heller&Itemid=281

- INECC. (13 de noviembre de 2016). Escenarios de cambio climático. Recuperado el 7 de junio de 2017, de INECC Cambio Climático: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>
- INEGI. (17 de marzo de 2017). Comunicado de prensa núm. 127/17. En México, sólo 34 de cada 100 municipios cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales municipales. Aguascalientes.
- Martínez-Austria, P.F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(5), 165-180.
- Moeller, G. (2014). Patógenos emergentes y reemergentes en agua. En P. Tello, P. Mijaylova, & G. Ruiz, *Temas de ingeniería sanitaria y ambiental: visión de expertos de América Latina y el Caribe*. (Vol. 1, pág. 359).
- OECD. (2011). *Water governance in OECD countries: a multilevel approach*. Paris: OECD Studies on Water. <https://doi.org/10.1787/9789264119284-en>
- OCDE. (2013). *Making water reform happen in Mexico*. Paris: OECD studies on water. <https://doi.org/10.1787/9789264187894-en>
- Paredes-Tavares, J., Gómez-Albores, M.A., Mastachi-Loza, C.A., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H., Bâ, K.M. (2018). Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin. *Water*, 10, 258. <https://doi.org/10.3390/w10030258>
- Peña-Peña, E. (julio de 2007) Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México. gaceta del IMTA (3) Recuperado el 29 de septiembre de 2017, de <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g03-07-2007/eficiencias-uso-agua.html>
- Pérez-Flores, L.S., Rodríguez Narváez, O.M., Gutiérrez Estrada, R.D., & Martínez-Austria, P. (2014). Índices de calidad del agua: un comparativo entre México, Estados Unidos y la Unión Europea. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica*. Puerto Vallarta, México: Asociación Mexicana de Hidráulica.
- Rekacewicz, P. (2006). Water Stress Index. Recuperado el 18 de 08 de 2017, de <https://www.grida.no/resources/5586>
- Secretaría de Economía (2012) Norma Mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas. Diario Oficial de la Federación, México. 20 de septiembre de 2012.
- Sandoval Villasana, A.M., Pulido-Flores, G., Monks, S., Gordillo Martínez A.J., Villegas Villarreal, E.C. (2009). Evaluación físicoquímica, microbiológica y toxicológica de la degradación ambiental del río Atoyac, México. *Interciencia*, 34(12), 880-887. ISSN 0378-1844.
- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). *Taking into account environmental water requirements in global scale-water resources assessment*. (CGIAR, Ed.) Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat, CGIAR.
- Tanigushi, M., Masuhara, N., & Burnett, K. (2017). Water, energy and food security in the Asia Pacific region. *Journal of Hydrology: Regional Studies* (11), 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.11.005>
- United Nations. (2011). *World Urbanization Prospects: the 2011 Revision*. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- World Economic Forum. (2017). *The Global Risks Report 2017*. Geneva: World Economic Forum.
- WWAP (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017*. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Paris: UNESCO.