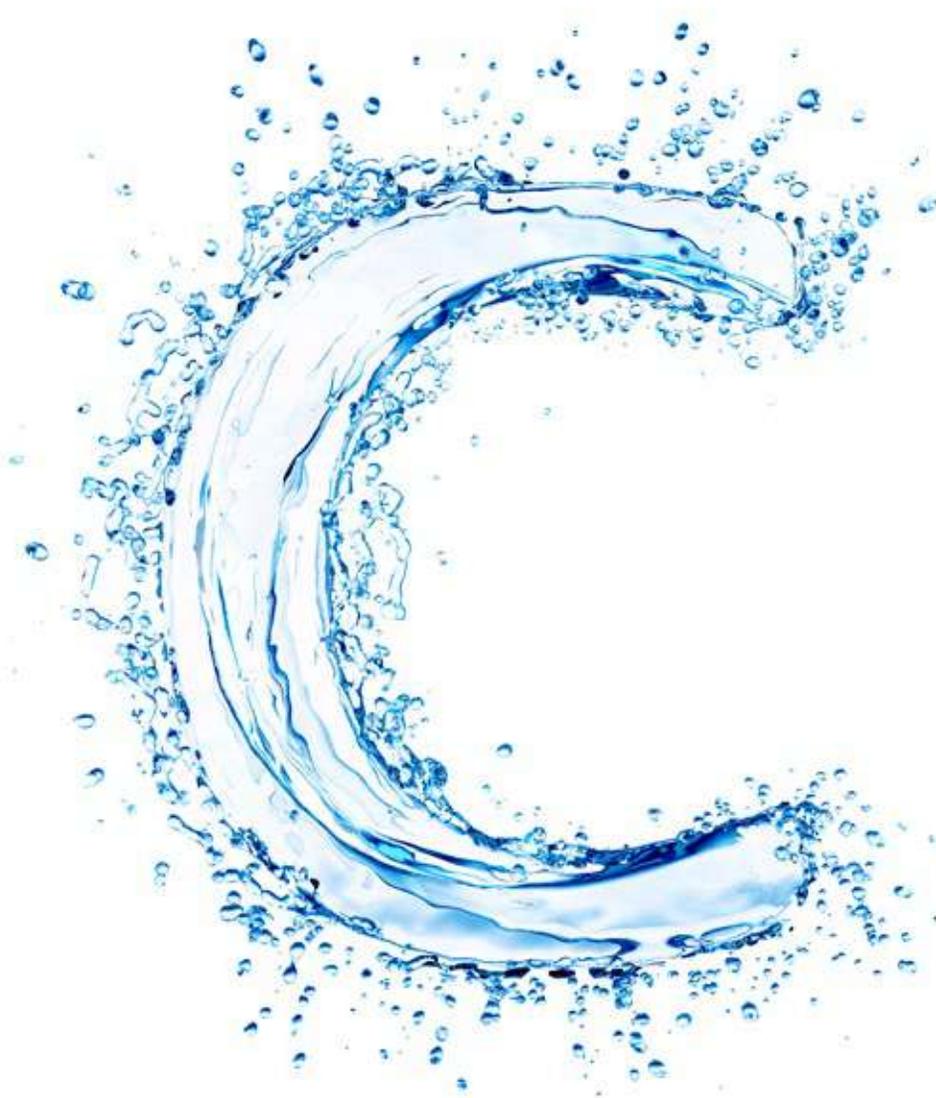


Calidad del Agua en las Américas

Riesgos y Oportunidades



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



Programa
Hidrológico
Internacional



INTERAMERICAN NETWORK OF ACADEMIES OF
S C I E N C E S



the interacademy partnership



CODIA

Calidad del Agua en las Américas

Riesgos y Oportunidades

IANAS La Red Interamericana de Academias de Ciencias

IANAS es la red regional de Academias de Ciencias creada para apoyar la cooperación con el interés de fortalecer la ciencia y la tecnología como herramientas para el avance en la investigación, desarrollo, prosperidad y equidad en las Américas.

IANAS

Co-Chairs: Juan Asenjo y Jeremy McNeil

Directora Ejecutiva: Adriana de la Cruz Molina

Comité Editorial

Gabriel Roldán (Colombia), Jose Tundisi (Brazil), Blanca Jiménez (Mexico), Katherine Vammen (Nicaragua), Henry Vaux (USA), Ernesto González (Venezuela) con la colaboración de Miguel Doria de UNESCO-IHP para Latinoamérica y el Caribe.

Coordinación Editorial

Katherine Vammen, Henry Vaux y Adriana de la Cruz Molina

Comité de Revisores

Gabriel Roldán (Colombia), Katherine Vammen (Nicaragua), Henry Vaux (USA), Ernesto González (Venezuela), Ricardo Izurieta (Ecuador), José Fábrega (Panamá) y Pablo Pastén González (Chile)

Programa de Agua de IANAS

Co-Chairs: Katherine Vammen (Nicaragua), Henry Vaux (USA) y **Co-Chair Honorarios:** Jose Tundisi (Brasil) y Blanca Jiménez (México)

Corrección de estilo

Ma. Areli Montes Suárez
y autores de los capítulos

Traducción

Suzanne D. Stephens

Diseño editorial

Víctor Daniel Moreno Alanís

Apoyo administrativo

Alejandra Buenrostro

Agradecemos las revisiones de los Comités Nacionales y Puntos Focales del Programa Hidrológico Internacional, así como a los miembros de CODIA que respondieron a la solicitud de revisión de los capítulos de esta publicación.

Impreso por The Inter-American Network of Academies of Sciences (IANAS) Calle Cipreses s/n, Km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, 14400 Tlalpan, Ciudad de México, México y por United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France, con oficina UNESCO en Montevideo, Edificio Mercosur, Luis Pereira 1992, 20 piso, casilla de correo 859, 11200 Montevideo, Uruguay.

© IANAS 2019

ISBN: 978-607-8379-33-0

Impreso en México

Al usar los contenidos de esta publicación, los usuarios aceptan los términos y condiciones de UNESCO Open Access Repositorio (<http://www.unesco.org/open-access/terms-use-ccbysa-en>). Para la versión impresa, la presente licencia aplica exclusivamente al contenido de la publicación. Para cualquier material que no esté claramente identificado como propiedad de UNESCO, se deberá solicitar previa autorización a publication.copyright@unesco.org o UNESCO Publishing, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP France.

Los contenidos y conceptos presentados en esta publicación de ninguna forma implican la expresión pública o de opinión de la UNESCO o CODIA en relación con la condición legal de algún país, territorio, ciudad o área o de sus autoridades, o relacionado con las delimitaciones fronterizas o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no representan necesariamente las ideas de IANAS, IAP, UNESCO o CODIA y no comprometen a la organización.

Esta obra ha sido impresa en papel ecológico: una parte de las fibras proviene de materiales reciclados y, otra, de bosques explotados de manera sustentable (certificación FSC). Además, el papel es libre de cloro elemental en su producción (Certificación ECF) con objeto de contribuir a la conservación de los recursos hídricos.

México

En las áreas de alta densidad poblacional, en el centro del país, se presenta la mayoría de los problemas de contaminación del agua por materia orgánica y contaminantes biológicos. El 89% de la carga total de contaminantes por DBO se genera en 20 cuencas hidrológicas que albergan 93% de la población y 72% de la producción industrial. Tan sólo las cuencas de Lerma, Pánuco, Bravo, San Juan y Balsas reciben 50% de las descargas de aguas residuales de la nación. La insuficiente infraestructura de tratamiento de agua residual municipal e industrial, así como las descargas no controladas a los cuerpos de agua, ocasionan serias repercusiones en la salud humana y en los ecosistemas acuáticos. En **México** esto se debe a la falta de normatividad, pero también, y en mayor medida, al incumplimiento de las normas vigentes y a la falta de vigilancia de su cumplimiento.

Calidad del agua en México¹

Adriana Carolina Flores-Díaz, Alma Chávez Mejía, Anne M. Hansen, Arsenio González Reynoso*, Beatriz Casasola, Blanca Jiménez Cisneros*, Blanca Lucía Prado Pano, Brenda Rodríguez Herrera, Daniel Murillo Licea, Erick D. Gutiérrez López, Fabiola Garduño, Gabriela Cabestany Ruiz, Ignacio González Mora, Itzkuauhtli Zamora Sáenz, Jorge Eugenio Barrios Reynoso*, José Antonio Barrios Pérez, José Joel Carrillo Rivera, Juan Carlos Durán Álvarez, Juana Amalia Salgado López, Leopoldo G. Mendoza Espinosa, Lorenzo Gómez Morín, María Aurora Armienta Hernández, María del Pilar Saldaña Fabela, Mariana Zareth Nava-López, Marisa Mazari-Hiriart, María Luisa Torregrosa y Armentia*, María Teresa Orta Ledezma Velásquez, Marinhe Concepción Rosas Rodríguez, Miguel Palmas Tenorios, Miguel A. Córdova Rodríguez, Miriam G. Ramos-Escobedo, Porfirio Hernández H, Ramón Pérez Gil Salcido, Ricardo Sandoval Minerero, Robert Hunter Manson, Ronal Sawyer G., Sergio S. Ruiz-Córdova y Sofía Esperanza Garrido Hoyos

1. Introducción

La calidad del agua es, en realidad, un término abstracto que sólo adquiere sentido práctico cuando se asocia a un uso y se definen las concentraciones y valores para medirla (Jiménez, 2001). Eso ocurre porque la calidad de agua que se requiere para beber, por ejemplo, es diferente a la calidad que se requiere para fabricar ladrillos. Así, puede incluso resultar que un mismo compuesto en un caso sea contaminante mientras que en otro sea inocuo o necesario; también, es posible que los valores de toxicidad sean diferentes. En México, el interés por la calidad del agua es relativamente reciente (de las últimas décadas), ya que la preocupación inicial siempre estuvo relacionada con la cantidad de agua. Este interés se ha reflejado en la generación de una cantidad significativa de información, la cual se presenta a continuación abordando aspectos institucionales, tipos de contaminantes, problemas de calidad y aspectos sociales.

2. Gobernanza de la calidad del agua

2.1 Marco Legal

La legislación mexicana reconoce que la calidad del agua es importante desde los puntos de vista social, económico y ambiental. El marco regulatorio es federal y tiene origen en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM, 1917). El Artículo 4 señala el derecho de toda persona a un ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar; el Artículo 25 es más explícito al señalar como meta el desarrollo integral y sustentable para el país,

1. Una versión extensa de este capítulo se encuentra disponible en <http://www.amc.unam.mx/>

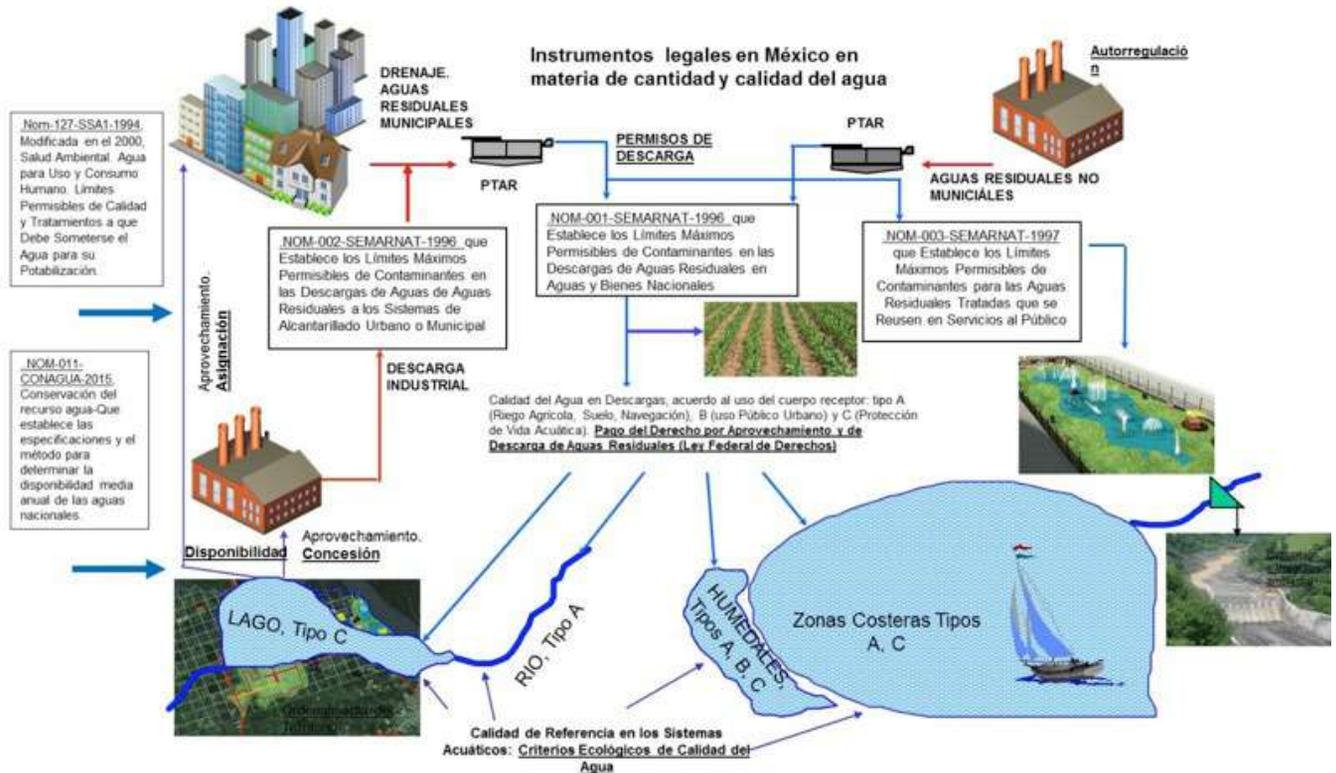
así como la necesidad del cuidado y conservación de recursos naturales; en el 27 se establece que el agua es propiedad de la nación e indica las medidas para evitar su deterioro y efectuar la restauración del equilibrio ecológico. Asimismo, la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA, 1988) otorga a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), y ésta a la Comisión Nacional del Agua, la política hídrica y la aplicación de los mecanismos normativos, de administración y de vigilancia, en tanto que los municipios tienen las funciones operativas en materia de agua potable, alcantarillado y saneamiento. La LGEEPA (1988) y la Ley de Aguas Nacionales (1992), reformada en 2004, indican que la planeación, el ordenamiento ecológico, la evaluación del impacto ambiental, el régimen de concesiones y asignaciones, los permisos de descarga de aguas residuales, el cobro de derechos, la autorregulación y las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establecen especificaciones, condiciones, parámetros y límites permisibles para el aprovechamiento de agua y des-

carga de aguas residuales son los instrumentos que materializan los preceptos constitucionales y la política hídrica nacional. Su aplicación se muestra en la **Figura 1**.

A diferencia de la mayoría de los países, la normatividad mexicana se distingue porque regula la calidad de las descargas en función del uso del cuerpo receptor (agua o suelo), en lugar de hacerlo en función del tipo de descarga o de la capacidad de asimilación de contaminantes. De esta forma reconoce que el agua es un recurso renovable que es reusado por medio del ciclo hidrológico y a través del tiempo (Jiménez, 1995 y 1996). Esta estructura normativa se estableció como una base mínima para construir la capacidad para su cumplimiento.

En la actualidad se distinguen diversos retos institucionales para enfrentar los problemas de contaminación, entre los que destacan: (a) la escasa coordinación intra e interinstitucional; (b) la carencia de metas de calidad de agua de largo plazo o para la atención de problemas específicos; (c) la continua y creciente sobreexplotación del agua;

Figura 1. Representación esquemática del marco normativo para la calidad del agua en México



(d) el enfoque regulatorio basado únicamente en el control de las descargas y con vigilancia limitada; (f) la carencia de políticas para evitar la generación de contaminantes; (g) el insuficiente e inadecuado tratamiento de las aguas residuales; (h) la ausencia de control de la contaminación difusa; (i) la escasa participación ciudadana; y (j) la ineficiente descentralización de funciones y recursos de la federación hacia estados, municipios y usuarios.

2.2 Participación social

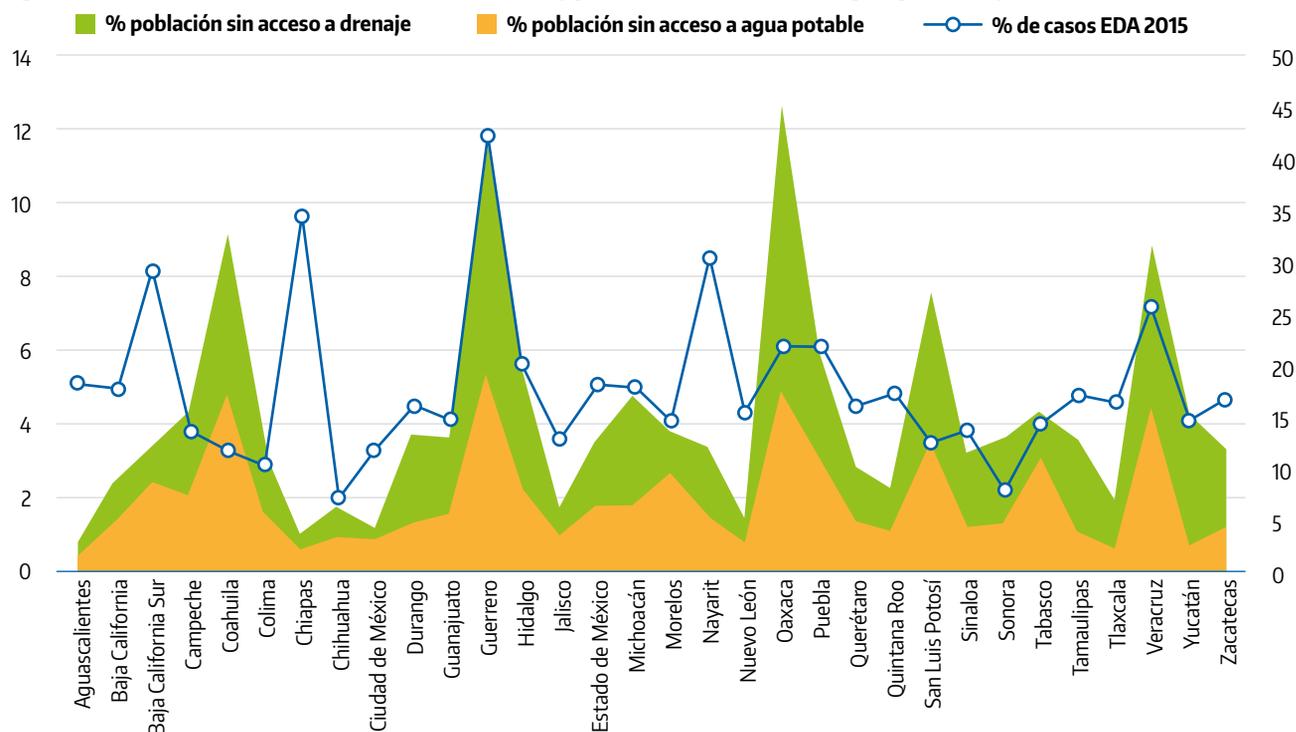
La participación social, definida en la Ley de Aguas Nacionales, se da por medio de los Consejos de Cuenca (Capítulo IV) o a través del Consejo Consultivo del Agua (Capítulo V bis). Los Consejos de Cuenca –integrados al menos 50% por usuarios y organizaciones ciudadanas o no gubernamentales– son órganos colegiados de integración mixta para la coordinación, concertación, apoyo, consulta y asesoría para la mejor administración de las aguas, el desarrollo de infraestructura hidráulica y

servicios respectivos, y la preservación del recurso. En cuanto al Consejo Consultivo del Agua (CCA), es un organismo autónomo de consulta integrado por la sociedad civil, con la función de tener una visión ciudadana independiente, propositiva, plural y representativa.

En la actualidad, la organización de usuarios, es decir, aquellos que cuentan con un título de concesión, en mayor o menor medida es una realidad en todas las cuencas del país, pero la participación de la sociedad en general es aún incipiente. El principal obstáculo que se enfrenta para contar con este tipo de participación es la carencia de recursos, obstáculo que se ha venido salvando parcialmente con la voluntad ciudadana y el surgimiento de fundaciones. Un ejemplo es la Fundación Gonzalo Río Arronte I.A.P. (FGRA), la cual fue fundada en 2000 y para 2015 había financiado 204 proyectos. Sin embargo, los recursos que pueden canalizar las ONG son todavía insuficiente para lograr una participación plena de la sociedad civil. Otro ejemplo rele-

Figura 2. Red Nacional de Medición de la Calidad del Agua. Sitios de monitoreo, CONAGUA



Figura 3. Incidencia de enfermedades diarreicas y población sin acceso a agua potable y saneamiento

Fuente: INEGI 2015

vante de participación social en México es la del movimiento “Agua para Todos, Agua para la Vida” que integra pueblos originarios, organizaciones sociales, trabajadores, sistemas comunitarios de gestión del agua e investigadores comprometidos con la construcción de un gobierno democrático del agua y el territorio. En esta iniciativa participaron más de 420 investigadores y organizaciones en talleres realizados en 26 estados de la República con la finalidad de elaborar una propuesta para la Ley de Aguas. Un tercer ejemplo son los observatorios ciudadanos que vigilan los servicios de agua potable y saneamiento, particularmente en las ciudades de La Paz, Valle de Bravo, San Miguel de Allende, Xalapa y Tuxtla Gutiérrez.

2.3 Monitoreo y bases de datos

Desde 2012, la Comisión Nacional del Agua realiza un seguimiento sistemático de la calidad de los recursos de agua del país. La Red Nacional de Medición de Calidad del Agua cubre 40 parámetros en 5,000 sitios de medición (Figura 2), abarcando presas y lagos (840), ríos (2,041), zonas costeras (939) y pozos (1,180). Los resultados alimentan el Sistema de

Información de Calidad del Agua (SICA, 2016), que es una base de datos parcialmente abierta al público en general y que resulta fundamental para planear y evaluar las acciones de prevención y control de la contaminación. De acuerdo con el SICA, para el agua superficial, 92% de los sitios tiene una calidad entre excelente y aceptable en términos de la DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígeno), 68% en términos de la Demanda Química de Oxígeno y 93% para el caso de los sólidos suspendidos totales. El 80% de los sitios presenta un contenido menor o igual a 1,000 coliformes fecales (NMP/100 ml). En áreas identificadas como contaminadas, se promueve el saneamiento, la inspección de fuentes y sanciones administrativas a empresas contaminadoras.

3. Calidad del agua del país

3.1 Situación de los recursos hídricos

Los problemas de contaminación de los recursos hídricos son serios, ya que los sistemas de tratamiento disponibles remueven 19% de la materia biode-

gradable (DBO₅) que se genera por las descargas municipales, lo que equivale a verter 9,7 toneladas de DBO₅ anualmente al ambiente (CONAGUA, 2016).

3.1.1 Cuerpos superficiales

La insuficiente infraestructura de tratamiento de agua residual municipal e industrial y las descargas no controladas de 8% de la población a las fuentes superficiales de agua (CONAGUA, 2016) provocan la contaminación microbiológica, orgánica y de nutrientes del agua con serias repercusiones en los ecosistemas acuáticos y en la salud humana. La falta de drenaje y de tratamiento se relaciona con una mayor incidencia de enfermedades intestinales, las cuales llegan a afectar hasta a 12% de la población en ciertos estados de la República (**Figura 3**).

3.1.2 Agua subterránea

En México, el agua subterránea representa cerca de 40% del volumen total de agua concesionada para uso en abastecimiento público (60.5%) y para riego agrícola (35.5%) (CONAGUA, 2016b).

La importancia del agua subterránea² se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios, pues 38.9% del volumen total concesionado para usos consuntivos³ (33,311 hm³ por año a 2015) procede de agua subterránea, siendo el mayor usuario el sector agrícola al utilizar 35.9% de ese volumen total (CONAGUA, 2016a).

El sistema de aguas subterráneas se compone de 653 acuíferos, de los cuales en 498 la disponibilidad es mayor a la explotación, 18 tienen problemas por intrusión marina, 32 contienen aguas salobres y los 105 restantes están sobreexplotados. La agricultura representa una causa importante de la sobreexplotación, pero también de la contaminación del agua subterránea, principalmente en el norte y centro del país. La agricultura provoca la contaminación del agua subterránea por los fertilizantes (aportes de nitrógeno) y por los pesticidas que se usan para aumentar la productividad de los cultivos. Se han encontrado plaguicidas persistentes en acuíferos de todo México, por ejemplo, en Jalisco

(Sandoval Madrigal, 2015), Yucatán (Metcalf *et al.*, 2011), Sonora (García de Llasera y Bernal-González, 2001), Sinaloa (García-Gutiérrez y Rodríguez-Meza, 2012), Guanajuato, Estado de México (Vicenta Esteller y Díaz-Delgado, 2001) e Hidalgo (Downs *et al.*, 1999). Pese a que desde 1988 la Comisión Intersecretarial Mexicana para el Control del Proceso y Uso de Plaguicidas, Fertilizantes y Productos Químicos Tóxicos (CICOPLAFEST) restringió el uso de ciertos plaguicidas, la implementación de dicha política ha sido difícil e inconsistente. Recientemente se formó el Programa de Monitoreo y Evaluación de Sustancias Persistentes y Bioacumulables (STPB, por sus siglas en inglés) para Cuencas y Acuíferos para cuantificar STPB, incluyendo plaguicidas, en el agua subterránea de Río Fuerte, Zacatepec, Tuxtla Gutiérrez, Cuernavaca y Acuífero de Ocosingo. Sin embargo, todavía se necesita mucha investigación en esta área para comprender la amplitud del problema (Hansen, 2012b).

Otra fuente importante de contaminación de las aguas subterráneas es la intrusión de agua salada. Dicho proceso se lleva a cabo cuando el agua del mar se infiltra en acuíferos costeros provocando su contaminación. Los casos más conocidos en México se encuentran en Baja California, Baja California Sur, Sonora y la Península de Yucatán. En un futuro, dicho fenómeno será más grave por el efecto combinado de la sobreexplotación y la elevación del nivel del mar como resultado del cambio climático (Cardona *et al.*, 2004; Metcalfe *et al.*, 2011; CONAGUA, 2015). Este proceso es similar al de la intrusión de agua geotérmica que ocurre en Puebla y otros estados del norte del país en donde las aguas subterráneas están contaminadas con azufre y otros sólidos disueltos (Flores-Márquez *et al.*, 2006).

Diversos procesos y el medio geológico pueden ser la causa de concentraciones elevadas de contaminantes en el agua de suministro al grado de hacerla inadecuada para suministro potable, o bien, para otros usos (riego, acuicultura, etcétera). En México, el agua subterránea se encuentra naturalmente contaminada por arsénico (As) y/o fluoruro (F-) en diversos sitios (Armienta y Segovia, 2008). En estas regiones minerales, la arsenopirita o la escorodita liberan grandes concentraciones de arsénico al agua, como ha ocurrido en Zimapán, Hidalgo, y posiblemente en Villa de la Paz, SLP (Armienta *et al.*, 2001; Razo *et al.*, 2004). Otro ejemplo

2. De los 348m³ por segundo de agua suministrada en el país, se estima que 60.5% proviene de fuentes subterráneas (CONAGUA, 2016b).

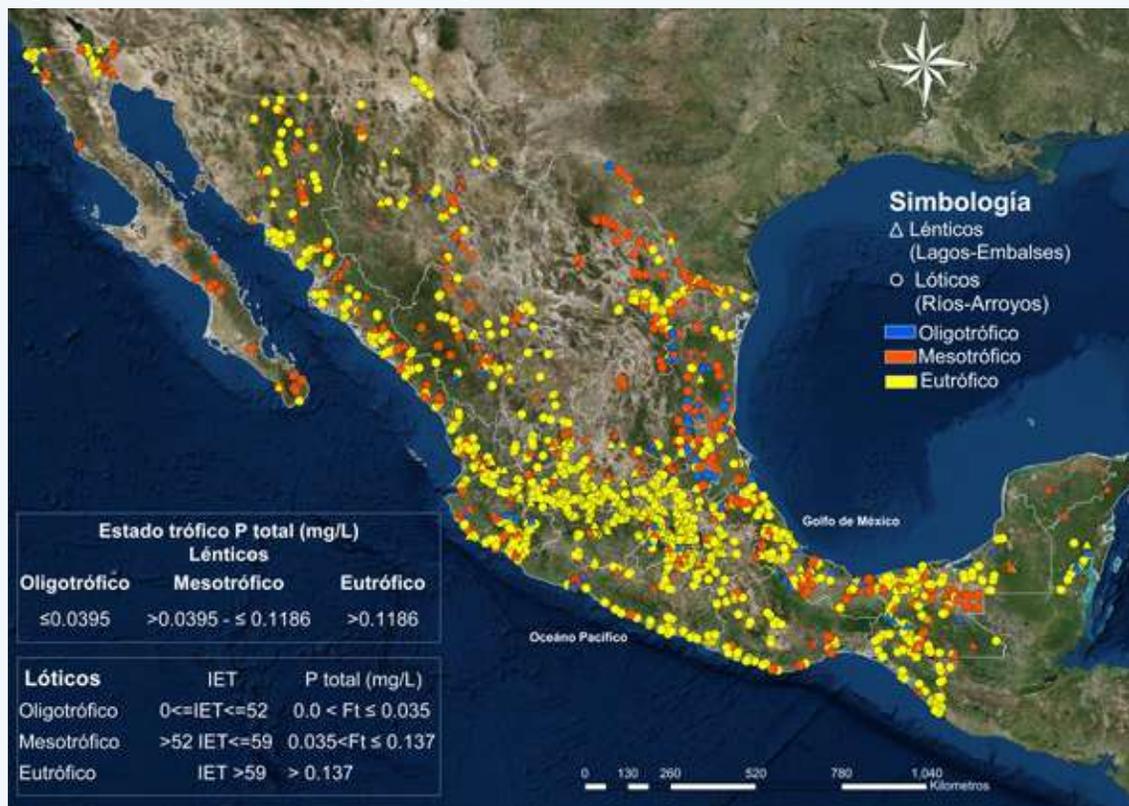
3. Uso consuntivo es la diferencia entre el volumen extraído y el descargado al llevar a cabo una actividad.

Cuadro 1. Eutrofización

La eutrofización provoca el agotamiento del oxígeno del agua, el incremento exacerbado de plantas acuáticas, la mortandad de peces y riesgos a la salud humana y animal por la presencia de toxinas. De acuerdo con el SICA (2016), el problema por eutrofización es apremiante en México. Usando la clasificación de CEPIS (2001) para lagos y embalses tropicales, de 321 cuerpos de agua lénticos evaluados de 2012 a 2016, 39% es eutrófico (con abundancia), 44.2% mesotrófico (condición intermedia) y 16.8% oligotrófico (con escasez) (**Figura 4**). Para los ríos tropicales y usando el Índice de Carlson modificado por Lamparelli (2014) para 1,963 sitios de medición, 80.1% es eutrófico, 18.9% mesotrófico y 1% oligotrófico. Además, en 54% de éstos se encontraron detergentes (SAAM) en concentraciones por arriba del criterio Ecológico de Calidad del Agua para la protección de la vida acuática de 0.1 mg/L (DOF, 1989).

Para resolver el problema se requieren procesos de depuración que eliminen el nitrógeno y fósforo del agua (lo que es costoso), aplicar técnicas de producción más limpia como, por ejemplo, producir detergentes con bajo contenido de fósforo y controlar la contaminación difusa, principalmente la proveniente de la aplicación de fertilizantes sintéticos en zonas agrícolas. Un caso extremo de eutrofización ocurre en el lago de Pátzcuaro.

Figura 4. Eutrofización en cuerpos de agua de México



es la interacción del agua termal con la fluorita de rocas volcánicas causante de la contaminación del agua potable con fluoruro en San Luis Potosí (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002). En Hermosillo, Sonora, la presencia de flúor (F) se debe a su liberación a partir de granitos (Valenzuela-Vásquez *et al.*, 2006). En

la zona central de Chihuahua, en donde hay altos niveles tanto de arsénico como de flúor, la presencia se debe a la interacción del agua con las riolitas (Reyes-Gómez *et al.*, 2013). Los procesos geoquímicos agua-roca con aguas termales son la causa de altas concentraciones de F- y As en Juventino Ro-

sas, Guanajuato, y en Los Altos de Jalisco (Hurtado y Gardea-Torresdey, 2004; Morales *et al.*, 2015). La desorción de As en acuíferos granulares constituye el proceso de contaminación en la Comarca Lagunera (Durango, Chihuahua y Coahuila), el cual además es agravado por la evaporación (Molina, 2004; Ortega-Guerrero, 2004). En la Comarca Lagunera se han registrado importantes problemas de salud por la ingesta crónica de agua con As desde 1958 (Cebrián *et al.*, 1994). Además, de manera artificial, los residuos mineros son también fuente de contaminantes como el arsénico, pero son muy difíciles de detectar como origen de contaminación en zonas naturalmente enriquecidas con este elemento.

El problema de la contaminación por arsénico y fluoruro ha sido parcialmente resuelto y eso sólo en algunos sitios. En Chihuahua, por ejemplo, se instalaron sistemas de ósmosis inversa para tratar el agua de consumo y ofrecerla a bajo costo. Sin embargo, no toda la población hace uso de esta agua posiblemente porque debe transportar los recipientes para llenarlos. En otros sitios, las autoridades mezclan el agua contaminada con agua de buena o mejor calidad, para diluir el contenido de As y F-. Otra solución ha sido reemplazar el agua subterránea por superficial, pero ello no se puede hacer en muchas zonas áridas o semi-áridas en donde existe el problema. En Zimapán y otros sitios se han instalado sistemas de tratamiento para remover arsénico y algunas veces también fluoruro, pero debido a los costos de operación y mantenimiento, muchos municipios operan las plantas de manera intermitente o, simplemente, las abandonan. Tanto el arsénico como el flúor pueden producir daños severos a la salud (cáncer, diabetes, hipertensión, problemas cognitivos, afectaciones dentales y de los huesos, gangrena, entre otros).

También hay problemas de contaminación por la recarga incidental de acuíferos con agua residual aportando patógenos, metales pesados y contaminantes emergentes (Gallegos *et al.*, 1999; Chávez *et al.*, 2011). Asimismo se conocen problemas de contaminación de acuíferos por descargas de la explotación minera. Sin embargo, muchas de las nuevas prácticas de explotación –como es la extracción de gas de esquistos bituminosos– no están contempladas en las normas sobre la calidad de agua (De la Vega Navarro y Ramírez Villegas, 2015).

3.2 Situación por tipo de contaminante

3.2.1 Contaminación orgánica y biológica

La mayoría de los problemas de contaminación por materia orgánica y contaminantes biológicos se encuentran en áreas con alta densidad poblacional, particularmente en el centro de México. En efecto, 89% de la carga total de contaminantes por DBO en el país se genera en 20 cuencas que albergan 93% de la población y 72% de la producción industrial. Las cuencas Bravo, Pánuco, Lerma, San Juan y Balsas reciben 50% de las descargas de aguas residuales de la nación (CONAGUA, 2016).

En el sureste de México, donde se ubican las regiones administrativas hidrológicas Balsas, Pacífico Sur y Lerma-Santiago-Pacífico, las actividades agrícolas son la principal fuente de la economía. En esta región las principales fuentes de contaminación por materia orgánica son la industria azucarera, la curtidora, la papelera y la porcina.

En el estado de Sonora, en el noroeste de México, los ríos Yaqui y Matape presentan serios problemas de contaminación orgánica en las partes más bajas de las cuencas y es ocasionada por descargas urbanas, agrícolas e industriales. La contaminación del Río Yaqui es agravada por la presencia de pesticidas que provienen de los campos agrícolas cercanos, así como por una elevada salinidad provocada por una elevada evapotranspiración y/o intrusión marina (Vega-Granillo *et al.*, 2011).

En la cuenca Lerma-Chapala –que es la más grande del país–, aunque las industrias generan un volumen bajo de agua residual descargan 130,500 toneladas/año de demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La contaminación no puntual de tipo orgánico también proviene de la zona de El Bajío, en la parte baja del Río Lerma, así como de desechos de ganado, particularmente de granjas porcinas. La industria de alimentos en la zona es también una fuente de contaminación no puntual, aunque en menor medida.

Con respecto a los coliformes, la mayor parte de las cargas microbiológicas se encuentra en las cuencas Lerma-Chapala y Balsas, particularmente en los estados de Michoacán, Jalisco, Guanajuato, Querétaro, México, Morelos y Puebla, donde la mayoría de los desechos son ganaderos y aguas residuales municipales sin tratamiento (CONAGUA, 2016).

3.2.2 Agroquímicos

En el país, el uso de agroquímicos es generalizado, tanto en la agricultura extensiva como en la de subsistencia. Por una parte, la cantidad de fertilizantes empleados en el país se ha generalizado, pero por otra su uso se ha intensificado pasando de 62.3 kg/ha en 2002 a 83.6 kg/ha en 2014 (datos.bancomundial.org). Así, el consumo en 2014 representó de manera aproximada un total de 4.2 millones de toneladas. Una revisión de casos a nivel nacional (Sánchez-Guerra *et al.*, 2011) encontró que no sólo es el empleo *per se* de plaguicidas, sino también su inadecuada aplicación. Ello ha ocasionado la intoxicación en trabajadores agrícolas y sus familias, observando una disminución en el conteo de espermatozoides y efecto genotóxicos, entre otros problemas de salud. Desafortunadamente, la alta marginación de las zonas agrícolas ocasiona que los trabajadores agrícolas no estén conscientes de los riesgos por su uso. Aunado a lo anterior, en el país se siguen empleando plaguicidas que han sido prohibidos a nivel internacional. Ello se debe en parte a que la lista de plaguicidas peligrosos (19 en total) no ha sido actualizada desde 1991 por La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS). Por otra parte, se da escaso seguimiento a la reglamentación existente sobre la fabricación, importación, almacenamiento, distribución, venta y aplicación de agroquímicos de la Secretaría de Salud (SSA), la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA).

El problema de la contaminación por plaguicidas del agua ya es generalizado en el país. Por un lado, en los estados en donde existe la agricultura intensiva –como Sinaloa, Sonora y Guanajuato–, la aplicación de agroquímicos es, igualmente, intensiva. Por otro lado, en lugares en donde la agricultura es de subsistencia, la aplicación también se lleva a cabo, si bien en menor escala, pero con medidas de protección aun más precarias, ocasionando la contaminación de agua, suelo y aire con el asociado aumento de riesgo a la salud humana y ambiental.

Como muchos casos en el país, la existencia de un marco regulatorio debe ser acompañado con un marco operativo que facilite su aplicación. Además, y con la finalidad de disminuir su consumo, deben ofrecerse alternativas a los productores, como incentivos económicos para adoptar el empleo de

agricultura orgánica o bien el Manejo Integrado de Plagas (MIP). Es de gran importancia capacitar a la gente de campo sobre los riesgos asociados al manejo de plaguicidas, tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

3.2.3 Metales y metaloides

Los metales se introducen a sistemas hídricos a partir de diversas fuentes como son los procesos de fundición, refinación y quema de combustibles, así como fugas, descargas de agua residual, vertido y lixiviación de basura. Algunos metales son muy tóxicos aun en muy bajas concentraciones, como plomo, mercurio, cadmio, cromo, cobre, zinc, aluminio, berilio, cobalto, talio, vanadio, níquel y metaloides como selenio y arsénico. El destino de estos metal(oid)es en cuerpos de agua se rige por numerosos procesos que incluyen sorción/desorción, precipitación/disolución y complejación/disociación. Algunos metal(oid)es son también sensibles a cambios en estado de óxido/reducción. Una vez en los cuerpos de agua, los metal(oid)es se transportan de la columna de agua al sedimento mediante el depósito de partículas de materia orgánica y óxidos de hierro y manganeso, donde se encuentran acumulados, actuando así el sedimento como destino de los metal(oid)es. En México, gobiernos, organizaciones no gubernamentales, universidades y centros de investigación realizan estudios de muestreo de metal(oid)es en cuerpos de agua. Sin embargo, no se han establecido programas de monitoreo continuo de metal(oid)es y, por lo tanto, no existen inventarios formales de estos contaminantes ni del riesgo de exposición que representan. El monitoreo de sedimentos tampoco es una práctica establecida, a pesar de que ello permite conocer la evolución histórica de la contaminación (Hansen *et al.*, 2013).

3.2.4 Salinización

La excesiva extracción de agua subterránea es una de las causas de la salinización de las aguas subterráneas en el país. De acuerdo con diversas publicaciones y trabajos de tesis (Carrillo-Rivera *et al.*, 2008) (Figura 5), ello se ha observado principalmente en zonas que obtienen su suministro de agua subterránea de roca fracturada en la Sierra Madre Occidental (ie., estados de Aguascalientes, Baja California, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Jalisco, San Luis Potosí, Zacatecas), o de medio gra-

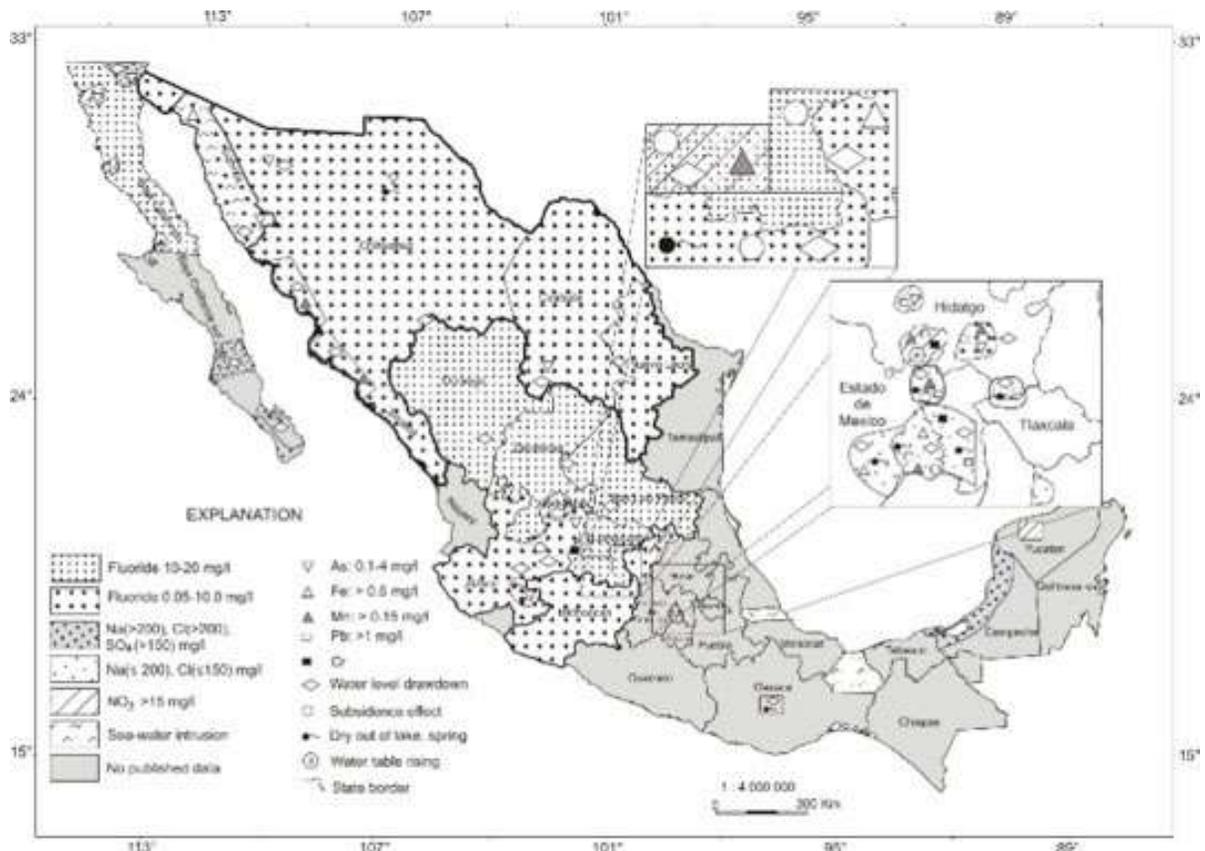
nular en cuencas sedimentarias de gran espesor (ie., Ciudad de México) y en las zonas costeras (ie., Baja California, Sonora). El agua extraída en diferentes lugares, a menudo alcanza niveles alarmantes –por arriba de la norma de calidad de agua–, en términos de sólidos disueltos totales, sodio, fluoruro, radiactividad o contenido de arsénico, entre otros. La respuesta del tipo de agua subterránea y su contenido en sales, así como su control correspondiente antes de que el agua llegue a la bomba de extracción, ha sido definida aplicando el funcionamiento de los Sistemas de Flujo Tóthianos de Agua Subterránea (SFTAS), metodología que, aunque su aplicación ha sido continuamente publicada desde los años 90, necesita ser incluida en una ley específica para dirigir cualquier actividad ambiental relacionada con el agua subterránea. Abordar correcciones a la salinización exige comprender la problemática antes

de actuar utilizando la metodología de SFTAS. El objetivo es entender cómo podrá ser posible controlar los procesos responsables relacionados con el aumento de salinización antes de que este efecto se produzca y sea observado en un pozo de extracción. Sin embargo, esta solución siendo más económica y más respetuosa con el ambiente, llama menos la atención que *soluciones estructurales* que a menudo crean efectos ambientales indeseables adicionales.

3.2.5 Contaminantes emergentes

Los contaminantes emergentes son los compuestos activos presentes en los productos de uso cotidiano, tales como medicamentos, productos de aseo personal y nanomateriales. El agua residual es una de las fuentes de estos contaminantes al ambiente. Los efectos tóxicos causados por los contaminantes emergentes son aún poco conocidos; no obstante,

Figura 5. Principales sitios con problemas de calidad del agua subterránea por su excesivo uso industrial y urbano, o bien, en donde la falta de entendimiento de cómo funciona el agua subterránea crea problemas de calidad por su extracción



Cuadro 2: El Balance Hídrico ¿es una solución?

Tal vez, una dificultad para resolver la pregunta referente a qué métodos científicos emplear para resolver los problemas de salinización del agua subterránea, sea enfrentarse al ya establecido "método" para estudiar el agua subterránea. Éste ha sido el procedimiento estándar en muchos países. En México, se inició a mediados de los años 60 bajo el nombre de *Geohidrología*: el "balance hídrico", enfoque que es puramente estático y se encuentra en fuerte conflicto con la visión sistémica del funcionamiento del agua subterránea. La interpretación de datos del agua subterránea basada únicamente en la respuesta hidráulica es, a menudo, inadecuada debido a que descuida evidencia química, biológica y geológica. Por ejemplo, la extracción incontrolada del agua subterránea de profundidad somera en San Luis Potosí (centro-norte de México) induce la mezcla de un flujo frío, bajo en fluoruro y sodio, así como de un flujo termal profundo y rico en fluoruro, en proporciones diferentes. Esto ha resultado en una mezcla en el pozo de extracción produciendo un flujo con alto contenido en fluoruro ($\geq 4.1 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$) y sodio ($\geq 60 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), que es peligroso para la salud humana y de la agricultura. La mezcla de flujos se lleva a cabo dependiendo del caudal de extracción, hidrogeología local, así como del diseño, construcción y operación del pozo. El entendimiento del sistema de flujo del agua subterránea provee soluciones alternativas para controlar y regular el ascenso de agua de flujos profundos y tomar ventaja de las reacciones químicas que controlan la solubilidad del fluoruro, y que permiten precipitarlo antes de que llegue al pozo de extracción.

el principio precautorio obliga a contar con estrategias para monitorearlos y removerlos del agua residual. México se encuentra entre los países con la mayor tasa de reúso de agua residual cruda para riego agrícola (Jiménez y Asano, 2008), por lo que continuamente elevadas cargas de contaminantes emergentes entran a los suelos agrícolas y pueden migrar a los reservorios de agua adyacentes a las zonas de riego (ver **Cuadro 3**). Estudios de monitoreo previos han encontrado sistemáticamente la presencia de contaminantes emergentes en el agua residual de la Ciudad de México, en niveles de $\mu\text{g}/\text{L}$ a ng/L (Gibson *et al.*, 2007; Siemens *et al.*, 2008; Durán *et al.*, 2009; Chávez *et al.*, 2011). Desafortunadamente, no se han encontrado reportes publicados que muestren la presencia de éstos en el agua residual de otras megaciudades, zonas fronterizas o poblaciones a lo largo del litoral mexicano. Más recientemente, el estudio de Félix-Cañedo *et al.* (2013) evidenció la presencia de fármacos, agentes plásticos y tensoactivos en el acuífero y fuentes de abastecimiento superficiales en la Ciudad de México. El origen de tal contaminación fue atribuido a las fugas en la obsoleta red de drenaje de la ciudad. Previamente, Metcalfe *et al.* (2011) reportaron la presencia de fármacos y drogas ilícitas en aguas de cenotes en la península de Yucatán, lo cual fue también relacionado con infiltraciones de agua re-

sidual. Debido a sus propiedades físicas y químicas, la mayoría de los contaminantes emergentes son pobremente removidos en los sistemas convencionales de tratamiento de agua residual (Miege *et al.*, 2009), por lo que, aun incrementando la actual tasa de tratamiento en México, no se esperaría una reducción notable de las cargas contaminantes en el agua tratada. Actualmente, se desarrollan sistemas de tratamiento terciario basados en biorreactores con membranas (Estrada-Arriaga y Mijaylova, 2001) y procesos de oxidación avanzada (Durán *et al.*, 2016), los cuales muestran altas remociones de contaminantes emergentes en agua residual, pero son muy costosos. Ante ello, una manera de abatir el problema es mediante el empleo de métodos de producción más limpios en la industria que eviten el uso de este tipo de compuestos en los productos que la sociedad emplea.

3.3 La deforestación y la calidad del agua

La deforestación impacta en la provisión de servicios ambientales por parte del suelo y resulta en la pérdida de la biodiversidad, la disrupción de los ciclos hidrológicos y geoquímicos, y el incremento en las emisiones de gases de efecto invernadero (Maser *et al.*, 1997; Maass *et al.*, 2005; Galicia y Zarco, 2014). En México, la deforestación ha sido más intensa en la región tropical del país (Palacio *et al.*,

2000; Velázquez *et al.*, 2002), donde se ha perdido más de 95% de la cobertura original de selva tropical (Durán y Lazos, 2004). Datos oficiales indican que los estados de Campeche, Chiapas, Jalisco, Quintana Roo y Yucatán reportan los mayores índices de deforestación del país (IRE, 2016). El problema se observa también en Aguascalientes, Veracruz

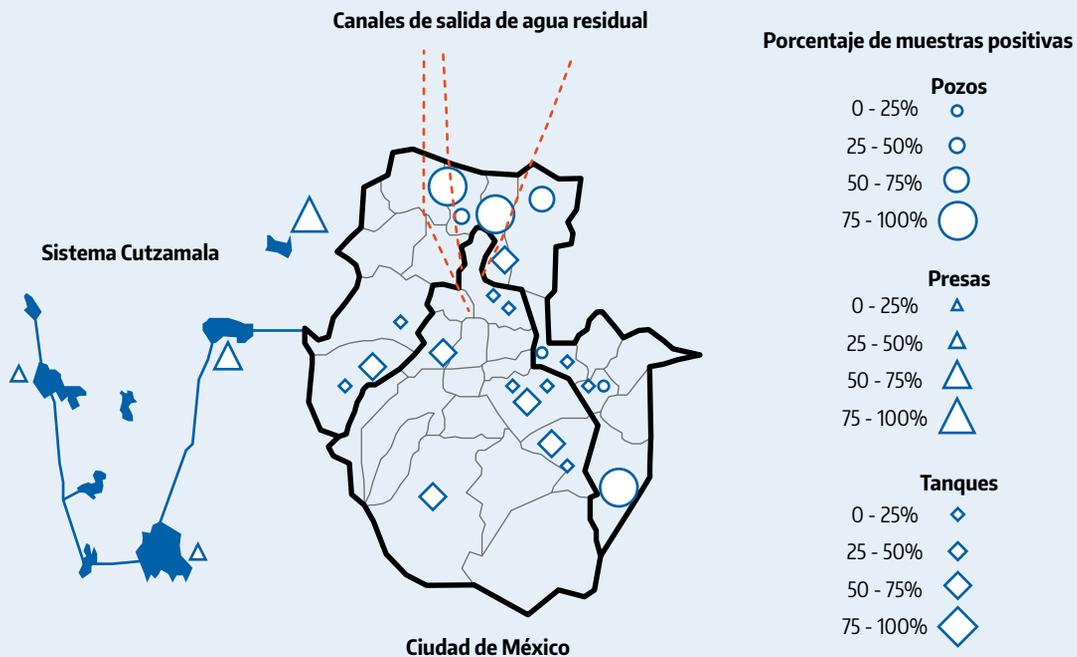
y Oaxaca (Chapa *et al.*, 2008; Vaca *et al.*, 2012; Chevalier y Buckles, 1995; Dirzo y García, 1992; Palacio *et al.*, 2000; Velasco-Murguía *et al.*, 2014; Corona *et al.*, 2016).

Los bosques contribuyen al mantenimiento de la calidad del agua en las cuencas hidrográficas al prevenir la erosión del suelo. Cuando la deforesta-

Cuadro 3. Contaminantes emergentes en el Valle de Tula

El agua residual de la Ciudad de México se reusaba sin tratamiento previo, para el riego de cultivos forrajeros en el Valle de Tula, 90 km al norte de la ciudad. El método de riego es mediante inundación de parcelas, lo que provoca la infiltración del agua al subsuelo. Los contaminantes emergentes presentes en el agua residual son en su mayoría adsorbidos por el suelo. No obstante, parte de ellos logra llegar al acuífero y por esta razón se han encontrado trazas (ng/L) de los contaminantes más hidrosolubles en el agua subterránea y en los manantiales de la región de Tula. Recientemente ha comenzado a funcionar una macroplanta de tratamiento para el agua residual de la Ciudad de México. El menor contenido de materia orgánica en el agua residual de riego podría provocar una disminución de ésta en el suelo y, con ello, una movilización de los contaminantes emergentes ahí retenidos. Cabe señalar que uno de los principales usos del acuífero de Tula es para consumo humano.

Figura 6. Presencia de contaminantes emergentes en fuentes de agua subterránea (pozos) y superficiales (presas) de la Ciudad de México y en tanques de almacenamiento donde el agua se guarda antes de ser bombeada a la red



Las marcas indican la frecuencia con la que se encontraron sustancias farmacéuticamente activas en las muestras de agua tomadas (n = 10).

ción ocurre, se da un aumento en la escorrentía, la cual transporta el suelo erosionado hacia los cuerpos de agua superficial, llevando consigo una serie de contaminantes entre los que destacan carbono, nitrógeno y fósforo, principales causantes de la eutrofización. En México, la deforestación debido a la conversión de bosque a tierras agrícolas y urbanas, o incluso por efectos climáticos, ha causado problemas graves en la calidad del agua en diversas regiones. Algunos ejemplos de ello se encuentran en la península de Yucatán (Evans, 2012; Trujillo-Jiménez *et al.*, 2011), en la cuenca alta del Río Lerma (García-Aragón *et al.*, 2007), y en la acumulación de arsénico y cromo en el lago Miramar en Chiapas (Hansen, 2012a). Una de las zonas cuyas fuentes de agua superficial se han visto mayormente impactadas por la deforestación en las montañas del estado de Veracruz (Martínez *et al.*, 2009).

4. Aspectos económicos y sociales

4.1 Salud

En el Artículo 4 de la *Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos* se estipula que “toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, saludable, aceptable y asequible” (DOF, 2017). Agua saludable se refiere a dos aspectos: por un lado, contar con la cantidad suficiente para vivir y realizar las actividades cotidianas y, por otro, que el agua de la que se dispone sea inocua o segura en términos de no causar enfermedad o daño al consumidor.

La fuente de contaminación más frecuente, y cuyos efectos pueden desencadenar daños agudos en la salud de la población, es las aguas residuales por su contenido de materia fecal y de patógenos (Maier *et al.*, 2009). Al mismo tiempo, el agua residual puede contener químicos tóxicos, muchos como desechos de procesos industriales que pueden producir enfermedades que se manifiestan a largo plazo.

La producción de alimentos es la actividad que mayor cantidad de agua consume y es importante que esta agua se use de forma segura para la salud. De manera dispersa, en el país se usa agua residual para riego en diversas áreas sin que se haga una evaluación y seguimiento de riesgos para la salud potencialmente asociados. Debido al manejo de los

recursos hídricos en México, en la actualidad debe considerarse no sólo el agua para uso y consumo humano, sino ampliar la posible vía de exposición a través de verduras, especialmente aquellas que se consumen crudas.

4.1.1 Enfermedades relacionadas con agua

Se trata de enfermedades que pueden adquirirse por la ingesta o por el contacto con agua contaminada. En México, la Secretaría de Salud, a través de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y la Dirección General de Epidemiología (DGEPI), es la entidad facultada para la vigilancia epidemiológica, la cual permite monitorear a nivel nacional los casos de enfermedad, entre ellos los que pueden ser ocasionados por consumo de agua y alimentos contaminados. Los datos oficiales de salud emitidos por la Secretaría de Salud (SS, 2016 y 2017), muestran que las enfermedades infecciosas intestinales causadas por microorganismos incluyen las bacterias: *Salmonella typhi*, *S. paratyphi*, *Shigella dysenteriae*, *Sh. flexneri*, *Sh. boydii*, *Sh. sonnei*, *Escherichia coli* enteropatógena, enterotoxigénica, enteroinvasiva, enterohemorrágica, así como protozoarios parásitos como son *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium* spp., e infecciones intestinales debidas a virus como son enterovirus, rotavirus, hepatitis agudas de tipo A (Knepper y Ternes, 2010), al igual que otras hepatitis virales, que pueden asociarse con transmisión a través del consumo de agua y de vegetales regados con agua contaminada por heces. Cabe señalar que, en particular para las bacterias, uno de los aspectos más preocupantes –adicional a su presencia en agua– es la resistencia a antibióticos causada por la gran dispersión de fármacos vertidos a cuerpos de agua a través de las aguas residuales que no cuentan con un tratamiento previo (Dalkmann *et al.*, 2012).

4.2 Pobreza

En la actualidad, 6.5% de la población mexicana habla una lengua indígena, aunque se autorreconoce como indígena un porcentaje mucho mayor: 21.5% (INEGI, 2015). Las 78 etnias identificadas (Zolla *et al.*, 2004) habitan en 25 regiones del sur, centro y norte del país y 23% del territorio indígena biocultural se ubica en las cabeceras de cuenca (Boege, 2008). En municipios indígenas, la población vive

en condiciones de pobreza en un rango de 80 a 89% y de pobreza extrema en un rango entre 41 y 50%. Las mayores concentraciones de pobreza indígena se encuentran en: Oaxaca (32.2%), Yucatán (28.9%), Chiapas (27.9%), Quintana Roo (16.6%) y Guerrero (15.3%) (Coneval, 2014). Asociado con la pobreza y la marginación, la cobertura de servicios de agua potable en viviendas en los municipios indígenas es de apenas 40.2% y, de servicios de drenaje, de 25.5% (INEGI, 2015).

Los indígenas obtienen el agua para uso doméstico no sólo de estos sistemas convencionales, sino de manantiales, ríos, pozos, ojos de agua y arroyos. Por ello, la contaminación de los cuerpos de agua les afecta directamente. La contaminación del agua afecta al menos a 33 de las 78 etnias que habitan en México.

4.3 Educación

De acuerdo con la CONAGUA, un programa efectivo de manejo sustentable del agua requiere la participación desde la ciudadanía en lo individual hasta las organizaciones comunitarias o de organizaciones sociales no gubernamentales. Para lograrlo, en la última década se han puesto en marcha programas gubernamentales para promover la cultura de uso y conservación de agua entre la población de México.

De acuerdo con las evaluaciones que se han hecho de la efectividad de dichos programas, se puede destacar que la evaluación se centra en el cumplimiento de la puesta en marcha de los programas y del uso de los recursos económicos para las acciones de divulgación y capacitación a la población, pero no cuantifica el efecto de los programas en las personas (González y Arzaluz, 2011), es decir, no hay información confiable de que la población esté adquiriendo conocimiento y desarrollando prácticas de conservación y uso sustentable del agua.

4.3.1 Programas de educación y currícula

En 2013, México inició un proceso profundo de reforma educativa que derivó finalmente en el desarrollo de una nueva propuesta de modelo educativo y, en particular, una adecuación de contenidos curriculares. Este nuevo modelo está planteado para la educación obligatoria (de los 3 a los 17 años) que comprende los niveles de educación básica (preescolar, primaria, y secundaria) y educación media superior. En un análisis de la propuesta del nuevo mo-

delo educativo se puede concluir que el tema de calidad del agua se aborda desde una perspectiva descriptiva básica y más con fines de consumo regulado por las características de escasez del agua.

En el documento sobre el nuevo modelo educativo, para el nivel de educación básica (de los 3 a los 14 años), se establece el campo formativo de Exploración y Comprensión del Mundo Natural y Social; en él se incluyen las asignaturas de conocimiento del medio, ciencias naturales y tecnología, y geografía en donde los contenidos curriculares específicos sobre el tema del agua están circunscritos a fomentar la prevención de la contaminación del agua y suelo, y conceptos generales sobre consumo sustentable en la mitigación del cambio climático. En el nivel de educación media superior (de los 15 a los 17 años) no hay referencia explícita al tema de agua.

En una revisión crítica sobre el tema, se deduce que el tema de recursos naturales se aborda como una serie de contenidos curriculares que se cubren en horas clase, pero no se ven los temas de sustentabilidad ambiental y uso de recursos comunes como un tema transversal que abarque varias disciplinas del currículo. En particular, el tema de agua se ve como un recurso limitado que requiere de regulaciones administrativas para su explotación. Esto es una visión limitada que no forma una conciencia global de la responsabilidad ciudadana que tendrán los niños y jóvenes en el futuro en garantizar la sustentabilidad de los recursos comunes del planeta.

4.4 Género

Mujeres y hombres tienen una relación diferente con el agua, poseen intereses y percepciones distintas sobre lo que sucede con el vital líquido. Esto se debe al papel que la sociedad asigna a cada uno; por ejemplo, debido a los roles de género, las mujeres están más relacionadas –aunque no exclusivamente– con los problemas del agua en el ámbito doméstico (poca disponibilidad, tandeos, mala calidad, aumento de tarifas, etcétera), mientras que los hombres conocen más sobre la situación del agua en lo productivo (RGEMA, IMTA, PNUD, 2006).

Cuando existen problemas relacionados con el agua, las mujeres son las responsables de buscar soluciones para proveer del líquido a sus hogares, lo que se suma al trabajo doméstico que en la mayoría de los casos está a su cargo. En ocasiones, estas

actividades suman hasta 30 horas a la semana del tiempo de las mujeres tanto rurales como urbanas (MMA, 2012).

4.5 Áreas Rurales

Dotar de agua y resolver el tema del saneamiento en las comunidades rurales en México es un desafío de gran envergadura debido a las condiciones de pobreza y a las características propias de las comunidades rurales del país. En el año 2010, uno de cada cuatro mexicanos habitaba en alguna de las 188,593 localidades menores de 2,500 habitantes; de éstas 139,156 localidades tienen menos de 100 habitantes (INEGI, 2010). De acuerdo con los cálculos del CONAPO, tres de cada cuatro localidades rurales tienen un alto o muy alto grado de marginación y en ellas reside 61% de la población rural. La marginación en los asentamientos rurales tiende a aumentar conforme se alejan de asentamientos humanos mayores y de las vías de comunicación. Las entidades federativas con mayor número de personas viviendo en localidades rurales son: Veracruz, Chiapas, Oaxaca, Estado de México, Puebla y Guanajuato.

De acuerdo con los resultados de la Encuesta Intercensal de 2015 realizada por el INEGI, 31.0% de las viviendas de las comunidades rurales menores a 2,500 habitantes no cuentan con drenaje alguno, por lo que sus moradores defecan al aire libre, mientras que los habitantes de 40.0% de las viviendas tienen que acarrear el agua de fuentes relativamente cercanas, aunque en ocasiones el acarreo es de distancias considerables.

A la dispersión geográfica de las comunidades ya señalada, hay que sumarle la escasa inversión pública para el abastecimiento de agua y el mejoramiento de los servicios de drenaje y alcantarillado destinados a estas comunidades. En los últimos años, a pesar de que ha aumentado el monto de inversiones destinadas a la infraestructura, no ha sido suficiente puesto que todavía persisten grandes diferencias.

4.6 Áreas Urbanas

Actualmente, 78% de la población mexicana habita en ciudades, es decir en localidades mayores de 2,500 habitantes. El Sistema Urbano Nacional está integrado por 384 ciudades, de las cuales 11 tienen más de un millón de habitantes y en ellas residen 41.3 millones de personas, lo que representa 51% de

la población total nacional (CONAPO, 2012). Las ciudades mexicanas presentan una cobertura del servicio de agua potable de 95.4%, y de alcantarillado de 96.3%. A nivel nacional, aproximadamente 10 millones de habitantes carecen de agua entubada y 11.5 de acceso al alcantarillado (CONAGUA, 2015).

El indicador de cobertura mencionado es insuficiente, ya que no permite identificar las desigualdades que se presentan al interior de cada ciudad, en términos de calidad del agua recibida y de la frecuencia con la que ésta se recibe (Jiménez, B. *et al.*, 2011). Sin embargo, una aproximación sobre la calidad del agua recibida en las viviendas urbanas se observa en el resultado de una encuesta efectuada en la Ciudad de México, en la que se encontró que 77% de la población accede al agua para beber mediante la compra de agua de garrafón o embotellada; 11% hierve el agua de la llave; 4% instala filtros en la llave de su casa y sólo 5% la toma directamente de la llave (INEGI, 2008).

La desconfianza sobre la calidad del agua entubada es una tendencia creciente en las últimas décadas. Un indicador de la desconfianza de la población con respecto a beber el agua de la llave es el crecimiento excesivo del mercado de agua embotellada. Un estudio del Banco Interamericano de Desarrollo señala que el volumen per cápita de agua embotellada consumido en México es el más alto del mundo. En 2010, México consumió 46% del total de agua embotellada en América Latina (BID, 2010).

Por otra parte, a partir del reconocimiento constitucional del derecho humano al agua en 2012, la mala calidad del agua a la que accede una población determinada puede ser denunciada como una violación a dicho derecho (CEUM, 2012). De manera que, además de ser un dato escasamente medido, la mala calidad del agua se ha convertido potencialmente en un elemento de movilización de la sociedad civil para exigir un derecho humano.

4.7 Conflictos relacionados en la industria, minería y agricultura

Los conflictos sociales por la calidad del agua se detonan cuando las comunidades locales perciben en la contaminación de ésta el riesgo de contraer algún tipo de enfermedad o porque afecta directamente sus actividades económicas, principalmente pesqueras o agropecuarias (Ávila, 2003). En menor medida, el interés ciudadano puede exigir la necesidad

de proteger los ecosistemas acuáticos, o bien modificar el paradigma sanitarista del desarrollo urbano que ha utilizado a los ríos y lagos como parte del sistema de drenaje (González *et al.*, 2010).

La contaminación que generan la industria y la minería en los cuerpos de agua se puede clasificar de dos maneras: de carácter sistémico y de emergencia ambiental. En el primer caso se encuentran las cuencas que, desde hace varias décadas, tienen un grado avanzado de deterioro por la ausencia de un aparato estatal efectivo que inspeccione, vigile y sancione a las empresas que descargan sus aguas sin previo tratamiento o sin cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la Ley de Aguas Nacionales. Ejemplos de este tipo son las cuencas de los ríos Atoyac, Lerma, Santiago, Blanco y Sabinas, los cuales se caracterizan por su alto nivel de contaminación desde el último tercio del siglo XX. En dichas cuencas se aprecia una creciente movilización de organizaciones ciudadanas que presionan a las autoridades para sanear el cauce.

Por otro lado, la contaminación por emergencia ambiental es aquella que se origina por el derrame de sustancias tóxicas en algún cuerpo de agua como resultado de una fuga accidental. En este rubro se aprecia una alta recurrencia de contaminación por hidrocarburos originados por el percance de vehículos que las transportan o por la sustracción ilegal de gasolina en ductos que atraviesan zonas rurales, así como derrames de sustancias como cianuro o ácido sulfúrico, relacionadas con la actividad minera. Para el año 2016, la PROFEPA reportó 1,882 derrames de hidrocarburos y otras sustancias químicas, de los cuales una gran mayoría terminó en un cuerpo de agua. La contaminación por la agricultura es en la que menos se identifica un carácter contencioso. Las investigaciones sobre el tema han revelado que ni los agricultores ni las autoridades del Gobierno perciben la dimensión del problema, de manera que reproducen prácticas no sustentables, incluso con financiamiento y subsidios de políticas públicas que favorecen el uso intensivo de agroquímicos (Pérez Espejo y Aguilar, 2012).

4.8 Impactos económicos de la calidad del agua

La calidad del agua potable tiene un efecto económico directo por pérdidas en la productividad económica y los costos de atención sanitaria de enfer-

medades atribuibles a la contaminación del agua. Existen diferentes propuestas metodológicas para valorar este impacto, pero no existe una cifra nacional estimada (Nigenda *et al.*, 2002).

En el manifiesto de impacto regulatorio presentado para el proyecto de norma oficial mexicana NOM-250-SSA1-2014 –con la cual se busca endurecer las restricciones de niveles permisibles de contaminantes y simplificar los muestreos– se calcularon costos por implementación de ósmosis inversa para la remoción de arsénico y flúor cercanos a los 4,000 millones de pesos (COFEPRIS, 2013), muy por encima del presupuesto disponible.

Por otra parte, el INEGI calculó para 2015, en el Sistema de Cuentas Económicas y Ecológicas de México, un costo equivalente a 0.3% del PIB por contaminación del agua y de 0.2% por el agotamiento de acuíferos (INEGI, 2017). Esto indica que tendría pleno sentido económico para México el desplegar los recursos y los instrumentos financieros necesarios para preservar la calidad del agua y asegurar la potabilidad del abastecimiento público.

5. Infraestructura para mejorar la calidad del agua

5.1 Potabilización

México cuenta con 922 plantas potabilizadoras con un gasto de diseño instalado de 142 m³/s (CONAGUA, 2016). De éstas, 48 plantas –con un gasto total de 2 m³/s– se encuentran fuera de servicio (CONAGUA, 2016). Los datos del INEGI (2015) reportan que 94% de la población total cuenta con acceso a agua proveniente de un sistema público, lo que implica que aproximadamente 6.5 millones de habitantes no cuenta con este servicio. Con respecto a la calidad del agua abastecida, los sistemas de información son poco accesibles al público. En este sentido la ley exige que el agua potable cumpla con los parámetros de calidad definidos por las normas: NOM-127-SSA1-1994 sobre agua para uso y consumo humano, y la NOM-179-SSA1-1998 para agua distribuida por sistemas de abastecimiento público (INEGI, 2016). Ante la incertidumbre de su calidad, la sociedad ha buscado alternativas para tener agua potable, mismas que implican la instalación de sistemas de purificación en los hogares o la compra de

agua purificada. México es el país que más agua embotellada consume en el mundo con 28,453 millones de litros al año (PWC, 2015).

5.2 Depuración

De acuerdo con la CONAGUA (2016a), en 2015 se generaron en México 450 m³/s de aguas residuales municipales (las cuales incluyen aporte de industrias conectadas al sistema de alcantarillado) y no municipales.⁴ Se estima que estas descargas representan anualmente una carga contaminante de 12.1 millones de toneladas de materia orgánica (medida como Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO₅), de las cuales 84% corresponde a descargas no municipales. Para reducir el impacto de dichas descargas, se cuenta con 5,309 plantas de tratamiento que depuran 191.4 m³/s, de los cuales 47% son descargas municipales y, el resto, industriales. El caudal tratado en 2015 ascendió a 120.9 m³/s, lo que implica que se trataba 57% de las descargas colectadas en el alcantarillado. En el caso de las plantas municipales, cerca de 79% del caudal tratado pasa por procesos de lodos activados, lagunas de estabilización o sistemas duales (combinación de procesos biológicos o biológicos y fisicoquímicos), lo que en la mayoría de los casos produce efluentes de calidad aceptable para el reúso en diversos sectores. Aun cuando el número de plantas existentes es considerable, el caudal promedio tratado en cada una de ellas es de 36 l/s, lo que indica un gran número de plantas pequeñas que generalmente tienen costos de operación unitarios mayores y cuentan con menor automatización que las plantas de mayor tamaño. De hecho, en 2015 operaban solamente 22 plantas municipales con caudal de operación mayor a 1,000 litros por segundo.

En cuanto a la eficiencia, las plantas de tratamiento municipales e industriales remueven únicamente 19% de la carga contaminante, por lo que aún se descargan 9.8 millones de toneladas de DBO₅ a los cuerpos de agua a lo largo del país (89% de ellas provenientes de descargas no municipales). Como

4. La CONAGUA (2016a) define a las descargas de agua residual municipal como las que se generan en los núcleos de población y se colectan en los sistemas de alcantarillado urbano y rural, mientras que las no municipales las generan otros usuarios, como la industria autoabastecida, y son descargadas a cuerpos de agua sin ser colectadas en el alcantarillado.

resultado, 32% de los 2,766 sitios donde se monitorea la demanda química de oxígeno presenta niveles de contaminado a fuertemente contaminado (DQO mayor a 40 mg/l) y, en su mayoría, se encuentra cerca de los centros de población que generan las descargas en la zona centro-occidente del país.

Debe mencionarse que en 2015 la inversión en saneamiento fue de 16% de los US\$ 2,233 millones invertidos en el sector agua –equivalentes a 0.20% del Producto Interno Bruto (PIB)–, mientras que casi 60% de la inversión fue en agua potable y alcantarillado (CONAGUA, 2016b).

5.3 Inversión en programas de calidad del agua

México cuenta con diversos instrumentos para financiar el desarrollo de su infraestructura y servicios hidráulicos. Los recursos para inversiones de capital provienen en su mayor parte de recursos fiscales vía la transferencia de subsidios del Gobierno federal a estados y municipios. Las inversiones para preservar la calidad del agua abastecida y sanear las aguas residuales forman parte del programa PROAGUA, dividido en los siguientes “apartados”:

- APAUR – urbano (infraestructura de agua y alcantarillado)
- PRODI - Proyecto para el Desarrollo Integral de Organismos Operadores de Agua y Saneamiento (eficiencia técnica y comercial)
- APARURAL –rural (cobertura y sostenibilidad)
- AAL – agua limpia (desinfección de agua potable)
- AMPIOS – apoyo para municipios de menos de 25,000 habitantes (fortalecimiento)
- PTAR – plantas de tratamiento de aguas residuales (inversión)
- INCENTIVOS – por el tratamiento de aguas residuales (subsidios a la operación)

La CONAGUA ejecuta directamente cerca de la mitad del presupuesto total en este rubro y participa en 80% de las inversiones (World Bank, 2016); el resto de la inversión proviene de otras áreas del Gobierno y del sector privado. Entre 2010 y 2015 los recursos disponibles llegaron a rebasar el monto estimado para solventar las brechas de cobertura (Campanaro y Rodríguez, 2014), estimada en \$32,200 millones de pesos anuales (ANEAS, 2016), pero debido a la situación económica del país, entre 2015 y

2017 se redujeron drásticamente; el último año la reducción fue superior a 70% (Montoya, 2017).

La inversión en infraestructura sufre de deficiencias en términos de equidad, eficiencia, estabilidad y suficiencia. Los fondos no siempre terminan siendo asignados donde más se necesitan; pueden variar de un año a otro sin que pueda preverse su evolución en el largo plazo y son insuficientes para recuperar el creciente rezago en rehabilitación y ampliación.

El ODG 6 para la provisión sustentable de agua y saneamiento contiene diversos indicadores que se

relacionan con la calidad del agua. La clasificación de México de acuerdo con su posibilidad de monitoreo para el ODG 6 se presenta en el **Cuadro 4**.

6. Conclusiones

El interés por la calidad de agua se ha reflejado en la generación de una cantidad significativa de información. Sin embargo, si bien mucho se ha avanzado en el país, aún falta hacer un uso cabal de estos datos para definir soluciones y establecer políticas públicas de

Cuadro 4. Calidad del agua en México y metas relacionadas con el Objetivo de Desarrollo 6

Metas:

6.1 Porcentaje de la población con acceso a agua potable segura: Hay datos sobre acceso y tipo de servicio por lugar de residencia, pero la información sobre la calidad del agua y de los servicios es incompleta o con acceso limitado.

6.2 Porcentaje de la población con servicios de saneamiento gestionados de forma segura y con instalación para lavado de manos con agua y jabón: Existe información sobre acceso, tipo de servicio y proporción de la población que usa servicios básicos de saneamiento y cuenta con manejo de desechos fecales. No hay datos sobre acceso a instalaciones para lavado de manos.

Indicadores

6.3.1 Porcentaje de aguas residuales tratadas de manera segura: Información disponible sobre la proporción de aguas residuales recibidas y tratadas, así como nivel de tratamiento. No hay información clara y suficiente sobre la calidad del agua tratada, operación y mantenimiento de la infraestructura

6.3.2 Porcentajes de cuerpos de agua con buena calidad de agua: En México no se analizan los cinco parámetros de calidad que propone la ONU para los acuíferos.

Meta 6.4.1 Cambio en la eficiencia del uso del agua en el tiempo: Hay estimaciones basadas en datos de productividad nacional, pero no para todas las actividades económicas que propone la ONU.

Meta 6.5 Grado de aplicación de la gestión integrada de los recursos hídricos GIRH (0-100): Nivel Medio, los elementos de la GIRH están institucionalizados y su implementación en marcha. Calificaciones altas para intercambio de datos transfronterizos e instrumentos de gestión de acuíferos y medias para el manejo de cuencas por falta de cooperación y coordinación interinstitucional.

Meta 6.6 Porcentaje de cambio en el tiempo de los ecosistemas relacionados con el agua medidos de acuerdo con: a) el área de ecosistemas (humedales, bosques y tierras secas); b) la cantidad de agua en los ecosistemas (ríos, lagos y aguas subterráneas); y c) la salud resultante de los ecosistemas: Información disponible sobre volumen almacenado y extensión para principales cuerpos de agua, verificación e interpretación terrestre de datos (incluida la clasificación del tipo de humedal), pero no para datos de la salud de los ecosistemas en todos los cuerpos de agua.

Meta 6.a Porcentaje de ayuda oficial para el desarrollo que se incluye en un plan de gasto coordinado por el Gobierno, ya sea: (1) en tesorería o (2) dentro del presupuesto: De los 32 estados que conforman al país sólo se cuenta con información sobre el gasto para agua y saneamiento en tres de ellos y es difícil aplicar la metodología ONU-GLASS.

largo plazo que efectivamente protejan y preserven la calidad del agua y los ecosistemas asociados con ella; por ejemplo, para completar la normatividad en materia de descargas de aguas residuales.

Cabe aclarar que no es sólo la falta de normatividad con respecto a la calidad del agua lo que causa su contaminación, sino, en mucha mayor medida, su incumplimiento y, de hecho, su falta de vigilancia. La falta de vigilancia de las normas de aguas residuales causa contaminación al ambiente y riesgos a la salud de la población. La falta de seguimiento a la norma de agua potable causa problemas de salud a la población, creando desconfianza sobre la calidad de agua potable y obligando a la población a recurrir a la compra de agua embotellada.

El problema de la contaminación afecta a la población en general, ya que la desconfianza respecto

a la potabilización del agua provoca que el consumo de agua embotellada sea un asunto común en el país, pero también notorio por sus impactos más fuertes en la población más desfavorecida como son mujeres, niños, grupos indígenas y pobres. La decisión de atender el problema de la calidad del agua es un asunto de todos los niveles del Gobierno, pero también es responsabilidad de la sociedad.

Los costos de la deficiente calidad de los cuerpos de agua del país son cubiertos de muchas formas, pero además provocan efectos secundarios; por ejemplo, el consumo de agua embotellada trae consigo la generación de millones de botellas de plástico que cada año se desechan. Entender que la calidad del agua puede ser un negocio para todos, es obligación del Gobierno y de la sociedad hacerlo una prioridad.

Cuadro 5. Experiencias exitosas

Las experiencias exitosas en México son dispersas y van desde una escala local hasta nacional, pasando por lo comunitario, lo regional y lo ciudadano. Se seleccionaron porque identifican oportunidades para fortalecer una gestión de la calidad del agua a partir de una visión de conservación ecológica de largo plazo que mantenga servicios ecosistémicos, del saneamiento ecológico como alternativa al saneamiento convencional y de la acción colectiva para identificar problemas y soluciones.

Modelos de Manejo y Uso Sustentable del Agua en las cuencas

Copalita-Zimatán-Huatulco (CZH), Oaxaca, México

Esta cuenca se encuentra en la costa de Oaxaca y ocupa una superficie de 282,300 ha, tiene una población de 86,392 habitantes que en su mayoría habita en 851 localidades dispersas y menores a 2,500 habitantes. El sistema CZH ha sido reconocido, nacional e internacionalmente, como de gran importancia por su biodiversidad (González-Mora *et al.*, 2009). Desde 2005, la Alianza formada por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) y la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA) trabaja en CZH para el desarrollo de nuevos modelos de manejo del agua en México. El objetivo ha sido consolidar un proceso de gestión participativa e integrada de las cuencas y, en particular, de los recursos hídricos con la participación de comunidades rurales y grupos indígenas con escenarios ambientales y socioeconómicos distintos.

A la fecha, se tienen 42 tipos de Modelos de Manejo y Uso Sustentable del Agua (MUSA) en 29 comunidades de ocho municipios, que benefician a 19,146 personas. Se han realizado 921 obras en total y hay una capacidad instalada para almacenar agua de lluvia y escurrimientos de 2,263 m³/año; de tratamiento para 12,496 m³/año de aguas grises, y de reúso de 8,865 m³/año. Como resultado se purifican 113 m³ de agua y se evita la descarga de 152,505 m³ de aguas negras al usar baños ecológicos secos.

Modelo de intervención para la provisión de agua y saneamiento en comunidades rurales dispersas (CRD)

Este proyecto tiene como objetivo el desarrollar y validar un Modelo de Intervención en comunidades rurales dispersas en México que integra elementos sociales y técnicos para mejorar el acceso a servicios básicos de

agua y saneamiento sustentables. Los actores del proyecto son: Sarar Transformación, que aporta el enfoque metodológico y técnico; World Vision México (WVM), como agencia operativa; 400 familias de cuatro estados de la República Mexicana; y el Banco Interamericano de Desarrollo, como la fuente principal de financiamiento. El proyecto tuvo una vigencia de 2014 a 2017 involucrando y beneficiando a familias en nueve comunidades piloto en el Estado de México, Michoacán, San Luis Potosí y Veracruz. La estrategia socio-técnica para la implementación de los sistemas incluyó (1) la capacitación de promotores locales de ASH –Agua Saneamiento e Higiene, también conocido como WASH, por sus siglas en inglés– en la coordinación y facilitación de diagnósticos participativos, aspectos de diseño, acompañamiento de la comunidad en la construcción, operación, mantenimiento y el monitoreo de los sistemas domésticos; y (2) el diseño técnico de los sistemas de agua y saneamiento, la elaboración de manuales de construcción y de uso-operación-mantenimiento.

Recuperación ambiental de la cuenca del lago de Pátzcuaro, Michoacán

Este programa inició en 2003 con el propósito de establecer las bases para el desarrollo sustentable de la cuenca por medio de: (a) detener y revertir el deterioro en la calidad del agua del lago de Pátzcuaro; (b) participar en la solución de conflictos sociales y mejorar la cultura ambiental; (c) reducir la deforestación, erosión y contaminación del suelo; (d) contribuir a fomentar la sustentabilidad en el manejo de los recursos y aprovechar adecuadamente la cantidad de agua superficial y subterránea. El programa constó de cuatro etapas para abordar siete problemas prioritarios: 1) conflictos sociales y cultura ambiental; 2) deterioro de la calidad del agua del lago; 3) deterioro de la salud, bienestar público y pobreza extrema; 4) deforestación, erosión y contaminación del suelo; 5) reducción pesquera y pérdida de la biodiversidad acuícola; 6) escasez de recursos económicos, y 7) disminución de la cantidad de agua del lago y del volumen del agua subterránea.

Se ha realizado más de un centenar de proyectos, acciones y estudios que han generado una serie de beneficios tangibles y medibles. De éstos, los más notables son haber conseguido movilizar voluntades y consensuar a nivel intergubernamental e interinstitucional sobre necesidades, acciones e inversiones a favor de la cuenca, mediante cinco humedales artificiales que a un bajo costo logran reducir la contaminación y los riesgos a la salud y al ambiente, así como la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales en los municipios de Pátzcuaro y Quiroga.

Decreto de Reservas de Agua en la cuenca del Río San Pedro Mezquital: un nuevo marco para el manejo de la calidad del agua en México

Este río se localiza en la vertiente del Pacífico, en los estados de Durango, Zacatecas y Nayarit. En la actualidad, es el único río que cruza la Sierra Madre Occidental libre de infraestructura y descarga en el mar. Se trata así de una cuenca alóctona que transporta agua, sedimentos, material genético y energía desde la planicie duranguense hasta las lagunas costeras de Nayarit. Estas condiciones únicas en México se han conservado por dos vedas de aguas superficiales establecidas en 1948 y 1955, y que fueron levantadas mediante decreto presidencial el 15 de septiembre de 2014.

La supresión de la veda representó una oportunidad para ordenar las extracciones de agua mediante el establecimiento de una reserva de agua para el ambiente y reservas complementarias para abastecimiento público y generación de energía. La reserva de agua para el ambiente fue determinada a partir de estimaciones de caudal ecológico con base en la NMX-AA-159-SCFI-2012, que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas (NMX). Esta norma representa un hito en la gestión del agua en México, alcanzado después de veinte años de publicación de la Ley de Aguas Nacionales por la activa participación de la sociedad civil, la academia y diferentes entidades del Gobierno federal.

Referencias bibliográficas

- Armienta M.A., Segovia N. (2008). Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. *Environmental Geochemistry and Health*, 30, 345-353.
- Armienta M.A., Villaseñor G., Rodríguez, L.K. Ongley, H. Mango (2001). The role of arsenic-bearing rocks in groundwater pollution at Zimapán Valley, México. *Environmental Geology*, 40, 571-581.
- Asociación Nacional de Empresas de Agua y Saneamiento de México A.C. (ANEAS) (2016). Página de la LXIII Legislatura. Recuperado de Cámara de Diputados: <http://www5.diputados.gob.mx/>
- Ávila, Patricia (2003). De la hidropolítica a la gestión sustentable del agua. En: *Agua, medio ambiente y desarrollo en el siglo XXI*. Patricia Ávila (Ed.). Zamora, Michoacán: El Colegio de Michoacán, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, pp. 41- 53.
- Boege, Eckart (2008). *El patrimonio biocultural de los pueblos indígenas de México*. México: INAH-CDI.
- Campanaro, A., & Rodríguez, D. (2014). *Strengthening the financial system for water in Mexico. From a conceptual framework to the formulation of pilot initiatives*. Washington, D.C.: World Bank.
- Cardona A., Carrillo-Rivera J.J., Huízar-Álvarez R., & Graniel-Castro E. (2004). Salinization in coastal aquifers of arid zones: an example from Santo Domingo, Baja California Sur, Mexico. *Environ Geol*, 45: 350-366 DOI 10.1007/s00254-003-0874-2.
- Carrillo-Rivera J.J., Cardona A., Edmunds W.M. (2002). Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, 261, 24-47.
- Carrillo-Rivera, JJ, Cardona, A; Huizar-Álvarez R; Graniel, E. (2008). Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 2(303-319).
- Cebrián, M. E., Albores A., García-Vargas G., Del Razo L.M. (1994). Chronic arsenic poisoning in humans: The case of México. In: J. O. Nriagu (Ed.), *Arsenic in the environment Part II* (pp. 93-107). New York: Wiley.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2001). *Metodologías Simplificadas para la Evaluación de Eutrofización en Lagos Cálidos Tropicales*. Programa Regional CEPIS/HPE/OPS, 1981-1990. 60pp.
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) (2013). Análisis de impactos y evaluación beneficio costo. Anteproyecto de Norma Oficial Mexicana NOM-250-SSA1-2014. México: COFEPRIS.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2013). *Base de datos de calidad del agua 2013*. México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2015). *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2015. México: CONAGUA, Diciembre de 2015.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016). *Estadísticas del Agua en México*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-CO- NAGUA. Recuperado de http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2016.pdf
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016a). *Estadísticas del Agua en México*. Edición 2016. México City: CONAGUA, Diciembre de 2016.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2016b). *Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento*. Edición 2016.
- CONAGUA-SEMARNAT (2014). Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre de 2014. Recuperado de http://www.CONAGUA.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario_Nacional_Plantas1.pdf [Último acceso 31 de marzo de 2017].
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) (2014). La pobreza en la población indígena de México, 2012. México, D.F.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO) (2012). *Sistema Urbano Nacional. Catálogo*. México: CONAPO.
- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) (1917). *Diario Oficial de la Federación* del 5 de febrero de 1917. Última reforma publicada DOF 24-02-2017. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/1_240217.pdf [10 de marzo de 2017]

- Corona, R., Galicia, L., J. L. Palacio-Prieto, M. Bürgi, & A. Hersperger (2016). Local deforestation patterns and their driving forces of tropical dry forest in two municipalities in Southern Oaxaca, Mexico (1985-2006). *Investigaciones Geográficas*, núm. 91, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 86-104.
- Chapa Bezanilla D., Sosa Ramírez, J., de Alba Ávila, A. (2008). Multitemporal study on forest fragmentation in Sierra Fría, Aguascalientes, México. *Madera y Bosques* 14(1):37-51.
- Chávez A., Maya C., Durán J., Becerril A., Gibson R., & Jiménez B. (2011). The Removal of Microorganisms and Organic Micropollutants in a Large Scale Unplanned Soil Aquifer Treatment. *Environ Pollut*, 159: 1354-1362. DOI:10.1016/j.envpol.2011.01.008
- Chevalier, J.M. & Buckles, D., (1995). *A Land without Gods: Process Theory, Maldevelopment and the Mexican Nahuas*. London and New Jersey: Zed Books. 194 pp.
- Dalkman, P., Broszat, M., Siebe, Ch., Willascheck, E., Sakinc, T., Huebner, J., Amelug, W., Grohmann, E., Siemens, J. (2012). Accumulation of Pharmaceuticals, Enterococcus, and Resistance Genes in Soils and Soils Irrigated with Wastewater for Zero to 1000 Years in Central Mexico. *PlosOne* 7(9): e45397.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. México: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, 13 de diciembre de 1989. pp. 7-23.
- Diario Oficial de la Federación (2017). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Párrafo adicionado, 8 de febrero de 2012. México: 5 de febrero de 2017.
- Dirzo, R. & García, M.C. (1992). Rates of Deforestation in Los Tuxtlas, a Neotropical Area in Southeast México. *Conservation Biology* 6: 84-90.
- Downs T.J., Cifuentes-Garcia E., & Suffet I.M. (1999). Risk Screening for Exposure to Groundwater Pollution in a Wastewater Irrigation District of the Mexico City Region. *Environ Health Persp*, 107(7): 553-561. DOI: 10.2307/3434397
- Durán-Álvarez, J. C., Becerril-Bravo, E., Castro, V. S., Jiménez, B., & Gibson, R. (2009). The analysis of a group of acidic pharmaceuticals, carbamazepine, and potential endocrine disrupting compounds in wastewater irrigated soils by gas chromatography-mass spectrometry. *Talanta*, 78(3), 1159-1166.
- Durán-Álvarez, J. C., Avella, E., Ramírez-Zamora, R. M., & Zanella, R. (2016). Photocatalytic degradation of ciprofloxacin using mono-(Au, Ag and Cu) and bi-(Au-Ag and Au-Cu) metallic nanoparticles supported on TiO₂ under UV-C and simulated sunlight. *Catalysis Today*, 266, 175-187.
- Durand, L., & Lazos, E. (2004). "Colonization and tropical deforestation in the Sierra Santa Marta, Southern Mexico". *Environmental Conservation* 31 (1): 11-21
- Esteller, Vicenta y Díaz-Delgado, C. (2001). Calidad y contaminación del acuífero profundo del Valle de Toluca, Edo de México. México. 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza, Brazil, 2001.
- Estrada-Arriaga, E.B., & Mijaylova, P.N. (2011). Influence of operational parameters (sludge retention time and hydraulic residence time) on the removal of estrogens by membrane bioreactor. *Environmental Science and Pollution Research*, 18(7), 1121-1128.
- Evans, S. (2012). King henequen: Order, progress, and ecological change in Yucatán, 1850-1950. In *A Land Between Waters: Environmental Histories of Modern Mexico*, Edited by Christopher R. Boyer, 328 pp.
- Félix-Cañedo, T. H., Durán-Álvarez, J., Jiménez-Cisneros, B. (2013). The Occurrence and distribution of a group of organic micropollutants in Mexico City's water sources". *Science of The Total Environment*, pp. 109-118.
- Flores-Márquez E.L., Jiménez-Suárez G., Martínez-Serrano R.G., Chávez R.E, & Silva-Pérez D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Valley aquifer system, Mexico. *Hydrogeol J*, 14: 1216-1230. DOI: 10.1007/s10040-006-0029-0.
- Galicia, L. y A. E. Zarco Arista (2014). Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystems Services & Management*, vol. 10, no. 4, pp. 275-288.
- Gallegos E., Warren A., Robles E., Campoy E., Calderón A., Sainz G., Bonilla P., & Escolero O. (1999).

- The Effects of Wastewater Irrigation on Groundwater Quality in Mexico. *Wat Sci Tech*, 40(2): 45-52.
- García de Llasera M.P. & Bernal-González M. (2001). Presence of Carbamate Pesticides in Environmental Waters from the Northwest of Mexico: Determination by Liquid Chromatography. *Wat Res*, 35(8): 1933-1940. [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00478-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00478-4).
- García-Gutiérrez C. y Rodríguez-Meza G.D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai: Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 8(3): 1-10. ISSN: 1665-0441.
- Gibson, R., Becerril-Bravo, E., Silva-Castro, V., & Jiménez, B. (2007). Determination of acidic pharmaceuticals and potential endocrine disrupting compounds in wastewaters and spring waters by selective elution and analysis by gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1169(1), 31-39.
- González, M.E. y M. Arzaluz (2011). El Programa de Cultura del Agua en el noreste de México. ¿Concepto utilitario, herramienta sustentable o requisito administrativo? *Región y Sociedad*, Vol XXIII, No. 51.
- González Reynoso, Arsenio; Hernández M., Lorena; Perló, Manuel; Zamora S., Itzkuahtli (2010). *Rescate de ríos urbanos. Propuestas conceptuales y metodológicas para la restauración y rehabilitación de ríos urbanos*. Ciudad de México: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, UNAM. 109 pp. Recuperado de <https://goo.gl/6MqXzy> [Última consulta, 21 de abril de 2017].
- Hansen, A.M (2012a). "Lake sediment cores as indicators of historical metal(loid) accumulation – A case study in Mexico". *Applied Geochemistry* 27, 1745-1752
- Hansen, A.M. (2012b). Nota técnica: Programa de monitoreo y evaluación de STPB en cuencas hidrológicas y acuíferos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 3(4): 167-195.
- Hansen, A.M., F. Mahé & C. Corzo-Juárez (2013). Metodología para determinar la liberación de metales del sedimento al agua en lagos y embalses. *Rev Int Contam Ambie* 29 (3) 179-190.
- Hurtado R., Gardea-Torresdey J. (2004). Environmental evaluation of fluoride in drinking water at "Los Altos de Jalisco", in the central México region. *J Toxicol Environ Health A*, 67(20-22): 1741, 1753.
- Iniciativa de Reducción de Emisiones (IRE) (2016). Forest Carbon Partnership Facility (FCPF). Carbon Fund, Emission Reduction Program. México: 17 de noviembre de 2016.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2008). Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares 2008. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2010). Censo de Población y Vivienda 2010. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015). Censo de población. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (marzo de 2017). PIB y cuentas nacionales. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/cn/ee/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2017). Agua. "Cuéntame de México". Recuperado de <http://cuentame.inegi.org.mx/territorio/agua/dispon.aspx?tema=T>
- Jiménez B. (1995). *Bases para el Manejo Integral de la Cantidad y Calidad del Agua en México*. México: Instituto de Ingeniería-UNAM. 90 pp.
- Jiménez B. (1996). *Elaboración del Proyecto de Norma y Fundamentación de la NOM-001-ECOL-1996 para el Control de Descargas a Cuerpos Receptores Nacionales*. México: Instituto Nacional de Ecología y Comisión Nacional del Agua.
- Jiménez B. (2001). *La Contaminación Ambiental en México: Causas, efectos y tecnología apropiada*. México: Limusa, 926 pp. ISBN: 968-18-6042-X (Distribución en Latinoamérica).
- Jiménez, B., & Asano, T. (2008). Water reclamation and reuse around the world. Water reuse: an international survey of current practice, issues and needs. London: IWA, 3-26.
- Jiménez, B., González, A., Gutiérrez, R. y Marañón, B. (2011). *Evaluación de la Política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México: UNAM, Academia Mexicana de Ciencias y Evalúa-DF.
- Knepper, T.P., & Ternes, T.A. (2010). Water Quality as a component of a Sustainable Water Supply. En: *Linkages of Sustainability*. Graedel, T.F. y van der

- Voet, E. Cambridge, Mass: MIT Press. pp. 233-241.
- Lamparelli, C. M. (2004). "Grau de trofia em corpos de água do Estado de São Paulo: Avaliação dois métodos de monitoramento". Tese (Doutorado) -Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Departamento de Ecologia, São Paulo, Brasil. 235 pp.
- Ley de Aguas Nacionales (1992). Ley publicada en el *Diario Oficial de la Federación* el 1 de diciembre de 1992. Última reforma publicada DOF 24-03-2016. Recuperado de: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf [11 de marzo de 2017]
- Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA). 1988. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de enero de 1988. Última reforma publicada DOF 24-01-2017. Recuperada el 11 de marzo de 2017 de <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/index.htm>
- Maass, J. M., P. Balvanera, A. Castillo, G. C. Daily, H. A. Mooney, P. Ehrlich, M. Quesada, A. Miranda, V. J. Jaramillo, F. García Oliva, A. Martínez Yrizar, H. Cotler, J. López Blanco, A. Pérez Jiménez, A. Búrquez, C. Tinoco, G. Ceballos, L. Barraza, R. Ayala y J. Sa-rukhán (2005). Ecosystem services of tropical dry forests: insights from long-term ecological and social research on the Pacific Coast of Mexico, *Ecology and Society*, vol. 10, no. 1, p. 17.
- Maier R. M., Pepper I. L., C. P. Gerba (2009). *Environmental Microbiology*. Cambridge, Mass: Elsevier (Academic Press). Recuperado de https://booksite.elsevier.com/samplechapters/9780123705198/Sample_Chapters/01~Front_Matter.pdf
- Martínez, M.L. Pérez-Maqueo, O., Vázquez, G., Castillo-Campos, G., García-Franco, J., Mehlreter, K., Equihua, M., Landgrave, R. (2009). Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management* 258, 1856-1863. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112709001364>
- Masera O. R., Ordonez J.M., & Dirzo, R. (1997). Carbon emissions from Mexican forests: current situation and long term scenarios. *Climatic Change* 35: 265-295.
- Metcalfe, C. D., Beddows, P. A., Bouchot, G.G., Metcalfe, T.L., Li, H., & Van Lavieren, H. (2011). Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Pollution*, 159(4), 991-997.
- Miege, C., Choubert, J.M., Ribeiro, L., Eusèbe, M., & Coquery, M. (2009). Fate of pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment plants—conception of a database and first results. *Environmental Pollution*, 157(5), 1721-1726.
- Molina, M.A. (2004). *Estudio hidrogeoquímico en la Comarca Lagunera, México*. M.en C. Tesis, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México D.F.
- Montoya, M.A. (20 de septiembre de 2017). V. La CO-NAGUA en el Proyecto de Presupuesto de Egresos 2017. *Ágora-Boletín del Grupo Parlamentario del Partido de la Revolución Democrática*, 15-17.
- Morales I., Villanueva-Estrada R.E., Rodríguez R., Armienta M.A. (2015). Geological, hydrogeological and geothermal factors associated to the origin of arsenic, fluoride and groundwater temperature in a volcanic environment "El Bajío Guanajuatense". *Environmental Earth Sciences*, 74, 5403-5415.
- Mujer y Medio Ambiente, AC (MMA) (2012). *Agenda de Género y Agua en Iztapalapa: Acciones para el disfrute del derecho al agua*. México.
- Nigenda, G., Cifuentes, E., y Duperval, P. A. (2002). *Estimación del Valor Económico de Reducciones en el Riesgo de Morbilidad y Mortalidad por Exposiciones Ambientales*. México: Instituto Nacional de Ecología. Recuperado de http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/valor_eco_riesgos_mort.pdf
- Ortega-Guerrero, M.A. (2004). Origin of high concentrations of arsenic in groundwater at the "La Laguna Region", northern Mexico, and implications on aquifer management. In Workshops: Program with Abstracts, 32nd IGC Florence. 1486 pp.
- Palacio, José Luis *et al.* (2000). "La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000". *Invest. Geog* [online]. n.43 [citado 2018-01-21], pp.183-203. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112000000300012&lng=es&nrm=iso ISSN 2448-7279

- Pérez Espejo, Rosario y Aguilar, Alonso (Coord.) (2012). *Agricultura y contaminación del agua*. Ciudad de México: Instituto de Investigaciones Económicas, UNAM. 288 pp.
- Price Water house Cooper (PWC). Beverage Industry in México (2015). Recuperado de <https://www.pwc.com/mx/es/knowledge-center/archivo/20150917-kc-beverage.pdf>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (2017). *Informe de actividades 2016*. Ciudad de México: PROFEPA. 148 pp. Recuperado de <https://goo.gl/1LDBSm> [Última consulta, 21 de abril de 2017]
- Razo, I., Carrizales L., Castro J., Díaz-Barriga F., Monroy M. (2004). Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152, 129–152.
- Red de Género y Medio Ambiente (RGEMA) - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) - Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) (2006). *Agenda Azul de las Mujeres*. México.
- Reyes-Gómez V.M., Alarcón-Herrera M.T., Gutiérrez M., Núñez López D. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, Mexico: contaminant levels, potential sources, and co-occurrence. *Water, Air, and Soil Pollution* 224: 1433, doi:10.1007/s11270-013-1433-4
- Sánchez-Guerra M., Pérez-Herrera N. & Quintanilla-Vega B. (2011) Organophosphorous pesticides research in Mexico: epidemiological and experimental approaches. *Toxicology Mechanisms and Methods*, vol. 21, no. 9, 681-691, DOI: 10.3109/15376516.2011.602130
- Sandoval Madrigal M.T. (2015). Contaminación por plaguicidas en acuíferos del Valle de Autlán, Jalisco. *Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, 5(10). ISSN 2007 - 7467.
- Secretaría de Salud (2016). *Boletín Epidemiológico*. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. Sistema Único de Información. Dirección General de Epidemiología. Boletín No. 1, Vol. 33. 9 de enero, 2016. México. Datos hasta semana 52 del 2015. Recuperado de <http://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/direccion-general-de-epidemiologia-boletin-epidemiologico>
- Secretaría de Salud (2017). *Boletín Epidemiológico*. Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. Sistema Único de Información. Dirección General de Epidemiología. Boletín No. 1, Vol. 34. 7 de enero, 2017. México. Datos hasta la semana 52 del 2016. Recuperado de <http://www.gob.mx/salud/acciones-y-programas/direccion-general-de-epidemiologia-boletin-epidemiologico>
- Siemens, J., Huschek, G., Siebe, C., & Kaupenjohann, M. (2008). Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City–Mezquital Valley. *Water Research*, 42(8), 2124–2134.
- Sistema de Información de Calidad del Agua (2016). Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Calidad del Agua. Subgerencia de Estudios de Calidad del Agua e Impacto Ambiental. Red Nacional del Monitoreo. Ciudad de México. Recuperado de <http://files.CONAGUA.gob.mx/transparencia/CalidaddelAgua.pdf>.
- Trujillo-Jiménez, P., Sedeño-Díaz, J.E., Camargo, J.A., López-López, Eugenia (2011). Assessing environmental conditions of the Río Champotón (México) using diverse indices and biomarkers in the fish *Astyanax aeneus* (Günther, 1860). *Ecological Indicators* 11, 1636–1646
- Vaca RA, Golicher DJ, Cayuela L, Hewson J, Steininger M (2012). Evidence of Incipient Forest Transition in Southern Mexico. *PLoS ONE* 7(8): e42309
- Valenzuela-Vásquez L., Ramírez-Hernández J., Reyes-López J., Sol-Uribe A., Lázaro-Mancilla O. (2006). The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo City, Sonora, México. *Environmental Geology* 51, 17-27.
- Vega-Granillo, E. L., Cirett-Galán, S., De la Parra-Velasco, M. L., & Zavala-Juárez, R. (2011). Hidrogeología de Sonora, en *Panorama de la geología de Sonora, México*, pp. 57-88. México: UNAM-Instituto de Geología.
- Vega-Granillo, Ricardo; Vidal-Solano, Jesús Roberto; Herrera-Urbina, Saúl Island (2011). Arc tholeiites of Early Silurian, Late Jurassic and Late Cretaceous ages in the El Fuerte region, northwestern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 29, núm. 2, pp. 492-513. Querétaro, México: UNAM.

- Velasco Murguía, A., E. Durán Medina, R. Rivera y D. Barton Bray (2014). Cambios en la cobertura arbolada de comunidades indígenas con y sin iniciativas de conservación, en Oaxaca, México. *Investigaciones Geográficas*, 83: 56-74.
- Velázquez, A., J.-F. Mas, J.L. Palacio-Prieto & G. Bocco (2002). Land cover mapping to obtain a current profile of deforestation in México. *Unasylva* 210, Vol. 53.
- World Bank (2016). México - Revisión del gasto público. Washington D.C.: World Bank Group. Recuperado en marzo de 2017 de <http://documents.worldbank.org/curated/en/284151472615491033/Mexico-Public-expenditure-review>
- Zolla, Carlos; Emiliano Zolla Márquez (2004). *Los pueblos indígenas de México, cien preguntas*. México: UNAM.