



Academia  
de Ingeniería  
México

# DOCUMENTOS DE ENFOQUE

Seguridad hídrica en  
México

[www.ai.org.mx](http://www.ai.org.mx)



---

*El presente documento fue elaborado con el apoyo del*





## **CONSEJO DIRECTIVO 2016 - 2018**

**Dr. Jaime Parada Ávila**

Presidente

**Dr. José Francisco Albarrán Núñez**

Vicepresidente

**Ing. José Antonio Esteva Maraboto**

Secretario

**Dr. Carlos Alfonso García Ibarra**

Tesorero

**Dr. Alberto Jaime Paredes**

Prosecretario

**Dra. Mónica Barrera Rivera**

Protesorero

**Física Patricia Zúñiga Cendejas**

Directora Ejecutiva

©Academia de Ingeniería México  
Calle de Tacuba 7,  
Centro Histórico, C.P. 06000, Ciudad de México, CDMX  
Impreso en México  
Noviembre 2017  
© Derechos reservados

Diseño de portada:  
Tania A. Zaldívar Martínez

Cualquier mención o reproducción del material de esta publicación puede ser realizada siempre y cuando se cite la fuente.

## CONSEJO ACADÉMICO 2016 - 2018

**Dr. Jaime Parada Ávila**  
Presidente

**Dr. José Francisco Albarrán Núñez**  
Vicepresidente

**Ing. José Antonio Esteva Maraboto**  
Secretario

**Dr. Carlos Alfonso García Ibarra**  
Tesorero

**Dr. Alberto Jaime Paredes**  
Prosecretario

**Dra. Mónica Barrera Rivera**  
Protesorero

### Presidentes de la Comisión de Especialidad de ingeniería

### Coordinaciones de Programas Multidisciplinarios

**Dr. Oscar Monroy Hermosillo**  
Ambiental

**Dr. Antonio Alonso Concheiro**  
Prospectiva y Planeación

**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**  
Biomédica

**Dr. Felipe Rolando Menchaca García**  
Educación e Investigación en Ingeniería

**M.I. Mario Ignacio Gómez Mejía**  
Civil

**Dr. Francisco Javier Trujillo Arriaga**  
Alimentos y Desarrollo Rural

**Dr. Eduardo Alberto Castañón Cruz**  
Comunicaciones y Electrónica

**Dr. Víctor Manuel López López**  
Recursos Naturales y Cambio Climático

**M. I. Julián Adolfo Adame Miranda**  
Eléctrica

**Dr. Gustavo Alonso Vargas**  
Energía y Sustentabilidad

**Dr. Gorgonio García Molina**  
Geofísica

**Dr. José Salvador Echeverría Villagómez**  
Competitividad e Innovación

**Dr. Moisés Dávila Serrano**  
Geológica

**M.C. Luis Gabriel Torreblanca Rivera**  
Manufactura y Servicios

**M. I. Alberto Lepe Zúñiga**  
Industrial

**Ing. Oscar Luis Valle Molina**  
Infraestructura, Transportes y Ciudades

**Dr. Guillermo José Aguirre Esponda**  
Mecánica y Mecatrónica

**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**  
Salud

**Dr. David Morillón Gálvez**  
Municipal y Urbanística

**M.C. Antonio del Río Soto**  
Naval

**Dr. Edmundo Del Valle Gallegos**  
Nuclear

**M.I. Miguel Ángel Lozada Aguilar**  
Petrotera

**Ing. Arturo Ricardo Rosales González**  
Química

**M. I. Luis Enrique Maumejean Navarrete**  
Sistemas

---

# SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO

---

**Polioptro F. Martínez Austria**

Cátedra UNESCO en Riesgos Hidrometeorológicos,  
Universidad de las Américas Puebla.

**Carlos Díaz Delgado**

Centro Interamericano de Recursos del Agua, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Autónoma del Estado de México.

**Gabriela Moeller Chávez**

Dirección de Ingeniería en Tecnología Ambiental y Biotecnología,  
Universidad Politécnica de Morelos.



## Contenido

|  |    |
|--|----|
| 1. LA ACADEMIA DE INGENIERÍA DE MÉXICO .....                           | 1  |
| 2. INTRODUCCIÓN.....   | 3  |
| La seguridad hídrica. Perspectiva general.....                         | 3  |
| 3. Situación del agua en México.....                                   | 6  |
| Disponibilidad. ....   | 6  |
| Aguas subterráneas.....  | 7  |
| Calidad en cuerpos de agua superficiales.....                          | 10 |
| 4. LOS RETOS DE LA SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO .....                   | 18 |
| Factores demográficos: crecimiento de la población y urbanización..... | 19 |
| Cambio Climático y Riesgos Hidrometeorológicos.....                    | 21 |
| Gobernanza del agua .....  | 27 |
| 5. Conclusiones y recomendaciones.....                                 | 29 |
| 6. Referencias .....   | 31 |



## 1. LA ACADEMIA DE INGENIERÍA DE MÉXICO

La Academia de Ingeniería de México (AIM) es una asociación, sin fines de lucro, que agrupa y promueve la participación y colaboración de los más distinguidos ingenieros y profesionales afines del país y del extranjero, quienes se han destacado en la práctica, en la investigación y en la enseñanza de las diversas ramas de la ingeniería, y que coadyuvan al desarrollo equitativo, creciente y sustentable de México.

Es una institución reconocida y respetada por su liderazgo y participación activa en los sectores público, privado y social de México, que tiene como propósito lograr una ingeniería mexicana innovadora, competitiva y protagónica en temas que impacten en el desarrollo sostenible del país.

La AIM es un centro de pensamiento y reflexión estratégico sobre la ingeniería, en especial, la nacional, dirigido a promover y difundir la vocación, la educación, el ejercicio profesional, la investigación, y la innovación en la ingeniería al más alto nivel y con compromiso social.

México no se puede explicar sin la contribución de los ingenieros, tanto en su infraestructura, como en la industria y servicios. En un entorno de cambios rápidos y profundos, de mayor competencia interna y externa, así como de la urgente necesidad de resolver rezagos añejos, el país deberá resolver los grandes desafíos para que pueda desplegar todo su potencial de desarrollo. Es por ello que la AIM estableció, como prioridad estratégica, contribuir al debate público sobre el rumbo que tomará nuestro país en los próximos años en temas prioritarios para el desarrollo. Se busca, así, lograr la incidencia en las decisiones nacionales más relevantes, convencidos de que la ingeniería mexicana tiene mucho que aportar en el análisis y evaluación de las políticas públicas relacionadas con infraestructura, energía, telecomunicaciones, clústeres industriales, medio ambiente y muchas otras áreas. Para lograrlo, la AIM decidió identificar los Grandes Retos de la Ingeniería Mexicana (GRIM) para focalizar en ellos sus esfuerzos de reflexión y propuesta. Los nueve GRIM son:

1. Alimentos y Desarrollo Rural
2. Competitividad e Innovación
3. Energía y Sustentabilidad
4. Educación e Investigación en Ingeniería
5. Infraestructura, Transporte y Ciudades
6. Manufactura y Servicios
7. Prospectiva y Planeación
8. Recursos Naturales y Cambio Climático
9. Salud

La actividad editorial de la Academia de Ingeniería de México representa el principal medio de expresión, en medios impresos y electrónicos, hacia el interior y el exterior, de su quehacer. Se ha diseñado para contribuir eficazmente al logro de una ingeniería mexicana innovadora, competitiva y protagónica ya que aborda temas estratégicos que impacten en el desarrollo equitativo y sostenible del país.

La actividad editorial de la AIM está encaminada a la divulgación de la ingeniería, especialmente a la difusión de su repositorio de conocimientos y de los resultados de reflexiones de los grupos colegiados de pensamiento estratégico. Las publicaciones se encuentran estructuradas en series, además de sus publicaciones periódicas, las cuales le dan agilidad y pertinencia a la expresión del trabajo de la organización.



## 2. INTRODUCCIÓN

### La seguridad hídrica. Perspectiva general.

Agua, energía y alimentos son los tres recursos básicos más importantes para la sobrevivencia y desarrollo de cualquier sociedad en este planeta y donde la energía y alimentos son dependientes en gran medida del recurso hídrico. La demanda, a nivel nacional y global, de estos tres recursos interconectados se ha venido incrementando sustancialmente debido al crecimiento demográfico, crecimiento económico, globalización de mercados, cambios tecnológicos y en los estilos de vida. El Consejo Nacional de Inteligencia de los Estados Unidos (US NIC, 2011) ha estimado que para el año 2030 a nivel global la demanda de agua, energía y alimentos se incrementarán en 40%, 50% y 35% respectivamente. Adicionalmente, estos recursos indispensables para toda nación se han visto afectados por efectos del cambio climático global y lamentablemente el agua es un recurso finito, con disponibilidad variable en tiempo, espacio, cantidad y calidad que exige una gestión mucho más elaborada que la hasta hoy implementada. El agua es sin duda la variable crítica de desarrollo en el mundo, pero principalmente para México, donde su atención adecuada eficaz y eficiente es simplemente impostergable.

El agua es el único recurso natural indispensable para la vida y el desarrollo social que no tiene ningún sustituto conocido. Mientras es posible elegir entre diversas fuentes de energía o materiales en casi todas sus aplicaciones, el agua, necesaria para la vida y para la producción de todos los bienes y servicios que empleamos, no tiene ningún elemento que la reemplace.

Diversas regiones y países, por otra parte, están experimentando escasez de agua. En muchos países se habla ya de una crisis de agua. La contaminación de los cuerpos de agua, junto con la sobreexplotación de las aguas subterráneas, son otra causa de inquietud entre los administradores de este recurso, así como entre la población.

Alcanzar la seguridad hídrica ha sido uno de los grandes retos de la humanidad a lo largo de la historia (ver Solomon, 2010). Sin embargo, actualmente la situación del agua en el mundo es motivo de creciente preocupación, tanto en organismos internacionales como en centros de pensamiento, entre constructores de políticas y tomadores de decisiones, en el sector público y privado.

En el más reciente reporte de riesgos globales del Foro Económico Mundial (World Economic Forum, 2017), la crisis del agua aparece como el tercer riesgo global de mayor impacto, y se ubica también entre los riesgos con mayores probabilidades de materializarse. La crisis del agua, además, está asociada a dos riesgos globales mayores: la ocurrencia de eventos climáticos extremos y la falla en la mitigación y adaptación al cambio climático. Estos riesgos, todos ellos de gran impacto y probabilidad de ocurrencia, se retroalimentan entre sí, de manera que la probabilidad o presencia de alguno de ellos aumenta la de los restantes. Ya en 2011, la iniciativa de agua del Foro Económico Mundial aseveró que “simplemente no podemos manejar el agua en el futuro como lo hemos hecho hasta ahora, o la red económica colapsará (World Economic Forum, 2011)”.

La Organización de las Naciones Unidas propone la siguiente definición de la seguridad hídrica (UN-Water, 2013):

*La capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sostenimiento de los medios de vida, el bienestar humano y el desarrollo socio-económico, para garantizar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con el agua, y para la conservación de los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política.*

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

Sin considerar los efectos del cambio climático, el Grupo de Recursos Hídricos elaboró un estudio de la demanda global de agua al año 2030 y encontró que, de no adoptarse medidas para incrementar la eficiencia en el uso del agua y disminuir su consumo, para el año 2030 la demanda será un 40% mayor que la oferta de agua (Water Resources Group, 2009). Sin embargo, estas cifras globales esconden las enormes diferencias en escasez entre regiones.

Existen diferentes índices de escasez de agua (i.e. Florke & Alcamo, 2007), y de entre ellos, es importante emplear alguno que tome en cuenta el uso ambiental. En el Reporte del Desarrollo Humano de 2006, dedicado al agua (UNDP, 2006), se empleó el Índice de Estrés Hídrico (WSI, por sus siglas en inglés) propuesto por Smakhtin, Revenga, & Döll (2004):

$$WSI = \frac{\text{Extracciones totales}}{\text{Disponibilidad total} - \text{Requerimientos de agua ambiental}} \quad (1)$$

Con los resultados de Smakhtin, Revenga, & Döll (2004), Rekecewicz (2006) produjo el mapa de la figura 1. Como puede observarse, existe un número muy elevado de cuencas grandes en las que el recurso agua está sobreexplotado, particularmente en Europa, Norte de África, Medio Oriente, India, China y Norteamérica. En el caso de México, prácticamente todas las cuencas del centro y norte del país, además de la cuenca del río Lerma y Valle de México, tienen niveles de alta explotación o sobreexplotación.

Los incrementos en la demanda de agua ocasionados por el incremento poblacional, la urbanización y el desarrollo económico se verán aumentados por el calentamiento global, principalmente en la agricultura, al tiempo en que en muchas regiones la disponibilidad natural se verá disminuida y el número de desastres naturales relacionados con el agua será mayor. Este escenario plantea un reto de enormes proporciones para el manejo del agua.

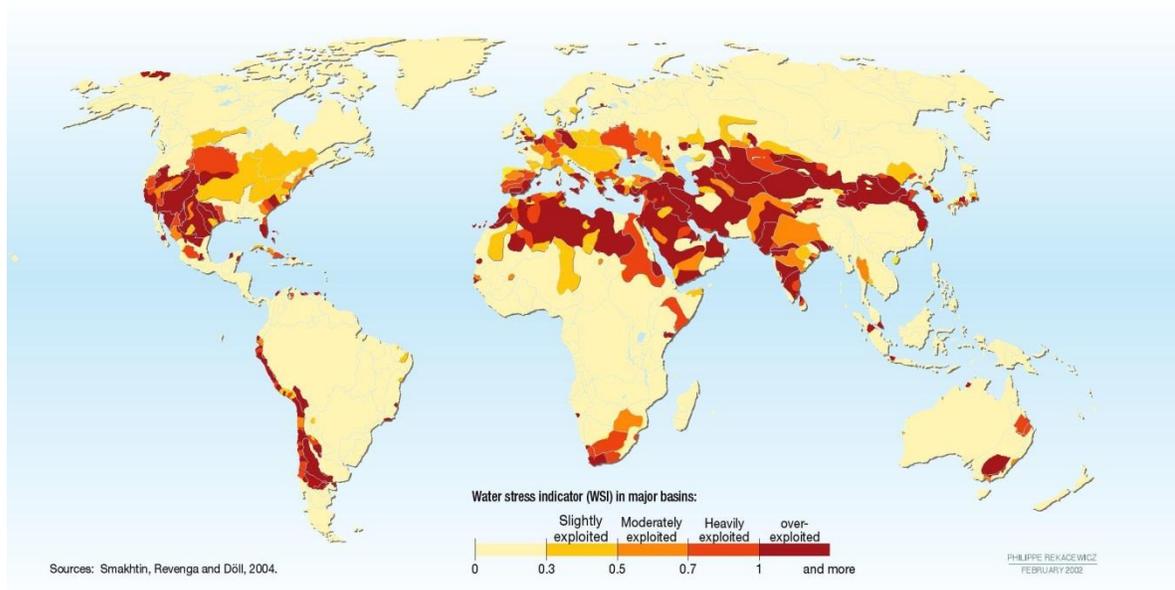


Figura 1. Índice de Estrés Hídrico en las cuencas mayores del mundo (Rekacewicz, 2006)

No existe un indicador que pueda integrar todas las variables implicadas en esta definición de la seguridad hídrica, de hecho, algunos autores sugieren que no es posible ni conveniente tratar de desarrollar un solo indicador, entre otras importantes razones debido a que la seguridad hídrica tiene diverso significado en cada región.

No obstante, es posible obtener una buena descripción de las condiciones de seguridad hídrica si se revisan los diversos aspectos que están incorporados en la anterior definición. Lo que significa un análisis de la situación de los recursos hídricos en cantidad (escasez o abundancia), calidad (calidad adecuada para el medio ambiente y los diversos usos), cobertura y calidad de servicios básicos de agua de suministro para diversos usos, resaltando el uso potable y el saneamiento, y un análisis de los riesgos relacionados con el agua (sequías, tormentas e inundaciones principalmente en riesgos climáticos; y en cuanto a salud, los patógenos emergentes). Para los anteriores aspectos, es conveniente determinar sus tendencias, a fin de comprobar el rumbo de la sustentabilidad para la seguridad hídrica.

La red del agua canadiense recomienda un marco de análisis para la evaluación y gestión de la seguridad hídrica basado en cuatro elementos nucleares (Bakker & Allen, 2015):

1. Evaluar el estado actual de la cantidad y calidad del agua.
2. Determinar los límites sobre los cuales el agua se torna insegura
3. Análisis de riesgos, tomando en cuenta los factores estresantes, como el desarrollo y el cambio climático
4. Integrar el monitoreo y evaluación de resultados en la toma de decisiones y políticas.

En este texto se sigue conceptualmente este marco de análisis, aplicado a los elementos principales que constituyen la seguridad hídrica.

### 3. Situación del agua en México

#### Disponibilidad.

La situación del agua en México ya alcanza niveles críticos en algunas regiones. En un análisis global, como se muestra en la figura 2, el balance hídrico de México ya es negativo, es decir que se consume más agua que la disponible de manera sustentable, a costa del medio ambiente y de la sobreexplotación de acuíferos. La brecha entre demanda y oferta, de 11.5 millones de metros cúbicos en 2010, de continuar con la tendencia actual, se elevará a 23 millones de metros cúbicos en 2030, aún sin considerar los efectos del cambio climático.

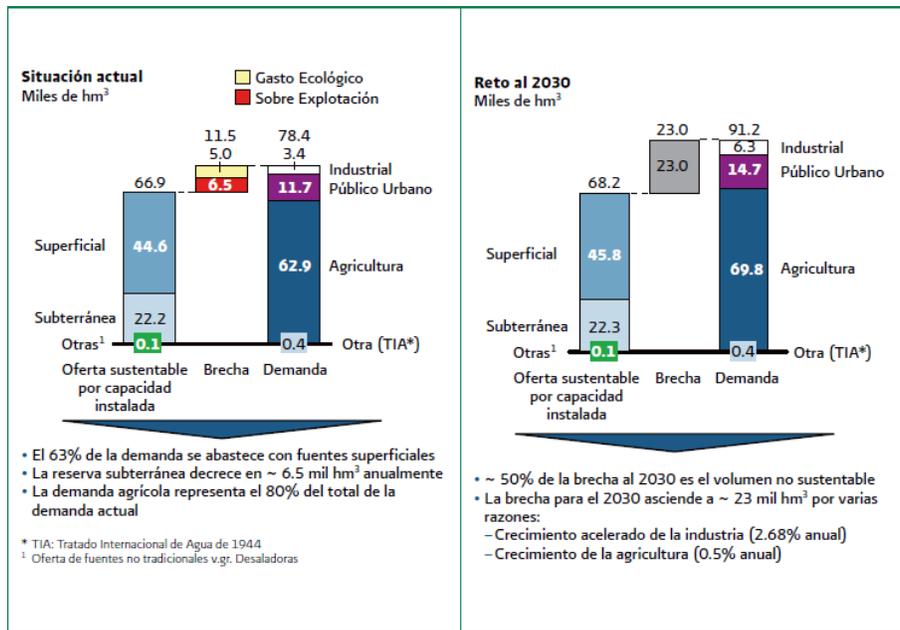


Figura 2. Balance global de agua en México entre 2010 y 2030 (CONAGUA, 2010)

Si se consideran solamente los efectos demográficos, de acuerdo con el criterio de estrés hídrico de Falkenmark que se reproduce en la tabla 1, para el año 2030 la mayor parte del territorio mexicano se encontrará en condiciones de estrés hídrico, escasez o escasez absoluta, como se aprecia claramente en la figura 3.

Tabla 1. Índice de estrés hídrico (Brown & Matlock, 2011).

| Índice (m <sup>3</sup> /hab/año) | Categoría /Condición |
|----------------------------------|----------------------|
| > 1,700                          | Sin estrés hídrico   |
| 1,000 a 1,700                    | Estrés Hídrico       |
| 500 a 1,000                      | Escasez              |
| < 500                            | Escasez Absoluta     |

Fuente: Brown & Matlock, 2011



Figura 3. Agua renovable per cápita en 2030 (CONAGUA, 2016).

En el aspecto de calidad del agua, y asumiendo una carga de contaminantes determinada en condiciones de ausencia de estrés hídrico (ya sea en unidades de concentración: mg/L; Kg/m<sup>3</sup> o de carga másica: mg/L\*d o Kg/m<sup>3</sup>\*d), éstos contaminantes se concentrarán en proporciones alarmantes causando un mayor riesgo a tornar el recurso como inseguro en términos de salud pública y/o salud ambiental (Moeller, 2014).

### Aguas subterráneas

El agua subterránea en México presenta una recarga media anual de 91 788 hm<sup>3</sup> de los cuales suministra el 38.9% (33 310 hm<sup>3</sup>/año) del consumo total de agua del país (85 660 hm<sup>3</sup>/año). El agua subterránea se utiliza principalmente para usos consuntivos (32 860 hm<sup>3</sup>/año por año al 2015; CONAGUA, 2016b); y específicamente para el riego de cultivos hasta en un tercio de la superficie total irrigada del país (unos 20 millones de hectáreas). Más de 71 millones de personas (55 millones en zonas urbanas y 16 millones en zonas rurales) dependen del abastecimiento de agua subterránea (7 320 hm<sup>3</sup>/año). Además, al menos el 50% de las instalaciones industriales auto abastecidas (que toman agua directamente de aguas superficiales o acuíferos) utilizan las aguas subterráneas en sus procesos (2 070 hm<sup>3</sup>/año; (CONAGUA, 2016b)) (Tabla 2).

**Tabla 2. Usos agrupados por tipo de fuente 2015 (CONAGUA, 2016b)**

| Uso agrupado                                   | Origen                                      |  | Volumen total<br>(miles de hm <sup>3</sup> ) | % de extracción |
|--|---|--|--|-----------------|
|  | Superficial<br>(miles hm <sup>3</sup> /año) | Subterráneo<br>(miles de hm <sup>3</sup> /año) |  |                 |
| Agrícola                                       | 41.89                                       | 23.47  | 65.36  | 76.3            |
| Abastecimiento público                         | 5.16  | 7.32   | 12.48  | 14.6            |
| Industria autoabastecida                       | 1.61  | 2.07   | 3.68   | 4.3             |
| Energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad | 3.70  | 0.45   | 4.15   | 4.8             |
| <b>Total</b>                                   | <b>52.35</b>                                | <b>33.31</b>                                   | <b>85.66</b>                                 | <b>100.0</b>    |

Según la estimación del balance hídrico nacional, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) identifica bajo la connotación negativa de "acuíferos sobreexplotados" aquéllos donde la explotación excede la recarga anual promedio, y la continuación a largo plazo de esta condición, es probable que produzca efectos negativos reflejados como impactos ambientales. Este tipo de impactos ambientales pueden ser tales como: desecación de humedales; desaparición de manantiales; reducción del flujo de base en ríos; hundimiento y deterioro de la calidad del agua subterránea, pudiéndose presentar estas consecuencias aisladas o de forma simultánea.

Problemas sociales y económicos también suelen surgir debido a la extracción intensiva de agua, término que parece ser más adecuado para la connotación de "acuífero sobreexplotado" (Simmers, Villarroya, & Rebollo, 1992; Lllamas & Custodio, 2003; Vrba, 2003). El territorio mexicano cuenta con 653 acuíferos (CONAGUA, 2016b) y el número de acuíferos sobreexplotados ha aumentado de 32 en 1975 a 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 101 en 2008 y 105 para 2015 (CONAGUA, 2016b). Entre los 653 acuíferos, 18 presentan problemas por intrusión salina (acuíferos costeros) y 32 están sometidos al fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres localizados principalmente en la Península de Baja California y el altiplano mexicano donde coinciden condiciones de baja precipitación pluvial, altos índices de radiación solar y consecuentemente evaporación, así como la presencia de aguas congénitas y minerales evaporíticos de fácil disolución (Tabla 3) (CNA, 2010; CONAGUA, 2016b). Estos cuerpos de agua sobreexplotados están ubicados en el centro, norte y noroeste del país, una región semiárida y árida que posee únicamente el 31% del total de agua disponible del país, pero concentra el 77% de la población total de México, e incluye los principales centros de población. En la figura 7 se muestran los acuíferos sobreexplotados y se indican algunos de los principales centros de población que se ubican en ellos (Domínguez Mora, y otros, 2012). Desde el punto de vista de la gestión, el aumento histórico de los acuíferos clasificados como sobreexplotados es una clara señal de la presión sobre las aguas subterráneas en México, debido al aumento de la población, la actividad industrial y las tierras de regadío (Esteller, Rodríguez, Cardona, & Padilla-Sánchez, 2012).

En el caso específico del deterioro de la calidad del agua relacionado con los cambios hidroquímicos, la extracción intensiva de aguas subterráneas favorece procesos como: a) la intrusión de agua de mar (Re, y otros, 2011); b) la mezcla de aguas superficiales con aguas subterráneas (La Vigna, Ciadamaro, Mazza, & Mancini, 2010); c) la mezcla de entre las aguas subterráneas altamente mineralizadas de acuíferos subyacentes o superpuestos o capas confinantes (Flores-Márquez, Jiménez-Suarez, Martínez-Serrano, & Silva-Pérez, 2006); d) la propagación lateral de plumas contaminantes (Vrba, 2003); y e) propagación de contaminantes de fuentes puntuales de superficie, como aguas residuales industriales y municipales sin tratar, a través de fracturas o fallas causadas por subsidencia (Mejía, Rodríguez, Armienta, Mata, & Fiorucci, 2007). Algunos ejemplos de este tipo de deterioro presentes en las aguas subterráneas mexicanas son los acuíferos del Valle de México, Valle de Toluca, Salamanca y San Luis Potosí. Los problemas de calidad del agua subterránea encontrados en dichos acuíferos son diversos, pero pueden dividirse en tres tipos: 1) procesos de salinización causados por una extensa y prolongada irrigación de aguas residuales y aguas subterráneas (sodio, cloruro y sulfato); 2) contaminación antropogénica causada por una protección inadecuada de los acuíferos vulnerables frente a descargas y/o desechos de las actividades turísticas e industriales y la agricultura intensiva (patógenos, nitratos, cloruros, sulfatos, metales pesados, hidrocarburos y compuestos emergentes (Moeller y Buelna, editores 2012; Moeller, 2014; Cortés, y otros, 2013); y 3) contaminación de origen natural relacionada con la evolución del proceso de oxidación-reducción (pH-Eh) de las aguas subterráneas y disolución de los minerales de las rocas. Si en el futuro la explotación intensiva de estos acuíferos continuara, la capa freática no sería restaurada y la calidad del agua subterránea sería inadecuada para muchos usos (para mayores detalles se refiere al lector a Esteller, Rodríguez, Cardona, & Padilla-Sánchez, 2012).

**Tabla 3. Acuíferos de México y grado de presión sobre el recurso hídrico por RHA 2015**

| Región Hidrológica Administrativa | Presión sobre el recurso hídrico (RHA) | Número de acuíferos |                   |                      |  | Recarga media (hm <sup>3</sup> ) |
|-----------------------------------|--|---------------------|-------------------|----------------------|--|----------------------------------|
|                                   |  | Total               | Sobreexplotado    | Con intrusión salina | Bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres |                                  |
| I Península de Baja California    | Alto (79.8%)                           | 88                  | 14                | 11                   | 5  | 1 658                            |
| II Noroeste                       | Alto (81.4%)                           | 62                  | 10                | 5                    |  | 3 207                            |
| III Pacífico Norte                | Alto (42.1%)                           | 24                  | 2                 |                      |  | 3 076                            |
| IV Balsas                         | Alto (49.8%)                           | 45                  | 1                 |                      |  | 4 873                            |
| V Pacífico Sur                    | Sin estrés (5.1 %)                     | 36                  |                   |                      |  | 1 936                            |
| VI Río Bravo                      | Alto (77.1%)                           | 102                 | 18                |                      | 8  | 5 935                            |
| VII Cuencas Centrales del Norte   | Alto (48.4%)                           | 65                  | 23                |                      | 18   | 2 376                            |
| VIII Lerma Santiago Pacífico      | Alto (44.8%)                           | 128                 | 32                |                      |  | 9 656                            |
| IX Golfo Norte                    | Medio (20.4%)                          | 40                  | 1                 |                      |  | 4 108                            |
| X Golfo Centro                    | Sin estrés (5.9%)                      | 22                  |                   |                      |  | 4 599                            |
| XI Frontera Sur                   | Sin estrés (1.7%)                      | 23                  |                   |                      |  | 22 718                           |
| XII Península de Yucatán          | Bajo (14.3%)                           | 4                   |                   | 2                    | 1  | 25 316                           |
| XIII Aguas del Valle de México    | Muy alto (138.7%)                      | 14                  | 4                 |                      |  | 2 330                            |
| Total nacional                    |  | 653                 |                   | 18                   | 32   | 91 788                           |
| Grado de presión:                 |  | Muy alto (> 100%)   | Alto [40% a 100%] | Medio [20% a 40%]    | Bajo [10% a 20%]   | Sin estrés < 10%                 |

Fuente: con base en información de CONAGUA, 2016b.

Por otro lado, la seguridad hídrica ha sido analizada por diversos autores en términos de gobernanza (Huntjens, y otros, 2012; Pahl-Wostl, Palmer, & Richard, 2013) y cambio climático (Arnell N. W., 1999; Arnell N. , 2004), entre otros aspectos, pero generalmente limitándose a la determinación de niveles de relación entre agua producida/agua consumida y evaluando la tasa de autoproducción. Sin embargo, parece destacar como más importante el análisis de diversidad de fuentes disponibles y en particular sobre su origen, es decir agua superficial o subterránea (Tanigushi, Masuhara, & Burnett, 2017)). Los tres sectores principales de consumo de agua son: agricultura; industria y urbano. Donde generalmente la demanda del agua destinada al consumo en la producción agrícola supera el 70% del total. De acuerdo con Tanigushi, Masuhara, & Burnett (2017), existen dos orígenes de agua renovable: los ríos y las aguas subterráneas en el primer horizonte de suelo. En contraparte, cabe señalar que la capacidad de almacenamiento de los acuíferos es muchas veces mayor que la de los ríos, pero que el corto tiempo de residencia del agua en los ríos tiene como resultado una rápida circulación del líquido a través de la red hidrográfica y una reincorporación más dinámica a otras fases del ciclo hidrológico aportándole una característica de renovabilidad de corto plazo. Ahora, con respecto al cambio climático, el agua subterránea pareciera ser más resiliente ante los posibles impactos de variabilidad pluvial severa pues su régimen hídrico es mucho más lento. Al mismo tiempo esta característica es la que le confiere una alta vulnerabilidad en el largo plazo por su consecuente lentitud de recuperación de niveles freáticos, agravándose aún más cuando una sobre explotación de agua subterránea está presente, tal es el caso de más de cien acuíferos en México.

El aspecto de seguridad hídrica relacionado con la producción de energía está estrechamente ligado con el agua superficial y en mucho menor grado con el agua subterránea, por lo que se puede aseverar que los cambios en los acuíferos, al menos en México, no tienen impacto representativo en la producción de energía.

Pero sí el contrario, es decir, en un requerimiento cada vez mayor de energía para la explotación de acuíferos por abatimiento de niveles freáticos, ejemplo de ello es el acuífero del Valle de Toluca el cual ha incrementado, en promedio, el costo de extracción por cada m<sup>3</sup> de agua a la superficie en más de 239% para 2006 considerando el periodo de 1968 a 2006. Este aumento de requerimiento energético representa un costo adicional anual de cerca de 3 millones U\$ de acuerdo con los costos de producción para el año 2005 (Fonseca, Esteller, & Díaz-Delgado, 2013).

Con respecto a la seguridad hídrica y su relación con la seguridad alimentaria, México se encuentra entre los principales importadores a nivel mundial de cárnicos y cereales, destacándose la importación de maíz (Tanigushi, Masuhara, & Burnett, 2017). En contraparte, hoy en día México sobresale a nivel mundial por su nivel de exportación de vegetales y frutos, a tal grado que la economía del país ha dejado de depender mayoritariamente de la explotación de petróleo y soportándose significativamente de la exportación de productos agrícolas y del turismo. En otras palabras, ha dejado de exportar petróleo y ahora exporta agua y energía virtuales a través de sus productos agrícolas, industriales o de servicios y con ello incrementando la vulnerabilidad de regiones donde el agua subterránea es la principal fuente para la generación de productos de autoconsumo y exportación, a niveles que rebasan su potencial de sustentabilidad. Aquí vale la pena aclarar el concepto de **agua virtual**, el cual es un término metafórico para describir la dinámica de suministro y demanda no sólo de agua como uso consuntivo sino como todo el recurso hídrico necesario en un análisis de obtención de un producto.

El excesivo bombeo de agua subterránea con fines de producción agrícola, industrial y de suministro urbano está conduciendo a un acelerado proceso de abatimiento de acuíferos donde su tasa de recarga natural ha sido rebasada, como puede observarse en la tabla 3 el grado de presión en 8 de 13 RHA es **Alto y Muy Alto**. Este fenómeno inducido por prácticas antropogénicas y con fines principalmente económicos, vulnera la sustentabilidad de la ya frágil seguridad hídrica y de alimentos no sólo en una escala local sino en la escala global a través del comercio internacional. De acuerdo con Dalin, Wada, Kastner, & Puma (2017), con información al año 2010, México extrae un volumen de 11.1 km<sup>3</sup>/año de agua subterránea que genera abatimiento en los acuíferos y que es dedicada a la irrigación. De esta producción agrícola irrigada con un volumen de agua subterránea no renovable exporta el 23% y su complemento (77%) es dedicado al consumo nacional y donde este fenómeno es el mismo, pero entre entidades federativas mexicanas. Países como Estados Unidos, Pakistán, Italia y México aparentemente se ven beneficiados por el ingreso de divisas al exportar productos agrícolas, pero esto no es viable en el mediano-largo plazo dado que dicha producción se ha generado a costo de una explotación insostenible de sus acuíferos y con ello generando un pasivo ambiental de grandes proporciones que comparándole con los ingresos obtenidos es varias veces superior. Por otro lado los países (o estados mexicanos) importadores, que aparentemente hacen ahorros de volúmenes hídricos, estarán también expuestos a riesgos de sustentabilidad en su seguridad alimentaria y son corresponsables del deterioro ambiental y reducción de disponibilidad de agua (seguridad hídrica) de su socio comercial correspondiente.

## Calidad en cuerpos de agua superficiales

La calidad de los cuerpos de agua es un aspecto fundamental de la seguridad hídrica. La baja calidad del agua inhibe su empleo para diversos usos, hace más costosos los sistemas de potabilización o, en casos extremos, la hace inútil para su uso, aún cuando esté disponible en cantidad.

La red de monitoreo de la calidad del agua, a cargo de la Comisión Nacional del Agua, cuenta con 5,000 puntos de monitoreo distribuidos en seis redes: aguas superficiales, aguas subterráneas, estudios especiales,

zonas costeras, descargas superficiales y descargas subterráneas. La red de aguas superficiales, que es la de interés directo para determinar el estado de los ríos, lagos y vasos, está constituida por 2,514 puntos de monitoreo (CONAGUA, 2016).

La evaluación de la calidad del agua se realiza a través de tres parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST). Se espera que la DBO<sub>5</sub> sea un indicador de la contaminación de origen biológico, tales como descargas de aguas residuales de origen urbano y doméstico; y la DQO un indicador de la contaminación de origen industrial.

Los niveles de parámetros que la CONAGUA considera para los diferentes grados de contaminación se muestran en la tabla 4. Con estos criterios y los datos de monitoreo, esta dependencia obtiene los mapas de calidad mostrados en las figuras 4 y 5.

**Tabla 4. Indicadores y rangos de calidad del agua empleados por la CONAGUA**

| DQO<br>mg/l    | DBO <sub>5</sub><br>Mg/l    | Estado del cuerpo<br>de agua |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|
| DQO ≤ 10       | DBO <sub>5</sub> ≤ 3        | Excelente                    |
| 10 < DQO ≤ 20  | 3 < DBO <sub>5</sub> ≤ 6    | Buena calidad                |
| 20 < DQO ≤ 40  | 6 < DBO <sub>5</sub> ≤ 30   | Aceptable                    |
| 40 < DQO ≤ 200 | 30 < DBO <sub>5</sub> ≤ 120 | Contaminada                  |
| DQO > 200      | DBO <sub>5</sub> ≥ 120      | Fuertemente<br>contaminada   |

Fuente: Adaptados de (CONAGUA, 2016)

Estos indicadores exhiben al menos dos problemas importantes: no toman en cuenta la existencia de múltiples contaminantes que, aún en cantidades pequeñas, son nocivos para la salud y/o el medio ambiente; y son demasiado laxos al declarar que la condición cualitativa del cuerpo de agua (de excelente a fuertemente contaminada).

Al respecto, el número de parámetros empleados en México como índices de calidad del agua, contradice las mejores prácticas internacionales. De hecho, hasta 1999 la Comisión Nacional del Agua recomendaba calcular un índice de calidad del agua (ICA) empleando un promedio ponderado de 18 parámetros, en lugar de los tres que hoy se emplean. En la tabla 5 se muestra una comparación de los índices de calidad usados en México, los Estados de América y la Unión Europea (Pérez-Flores, Rodríguez Narváez, Gutiérrez Estrada, & Martínez-Austria, 2014). En esta tabla, el ICA-NSF es empleado por la National Sanitation Foundation; el ICA-Dinius considera cinco usos del agua; DQWI, es el Drinking Water Quality Index y, finalmente, el UWQI, Universal Water Quality Index es empleado en la Unión Europea. Para una completa descripción de los indicadores se recomienda ver (Pérez-Flores, Rodríguez Narváez, Gutiérrez Estrada, & Martínez-Austria, 2014).

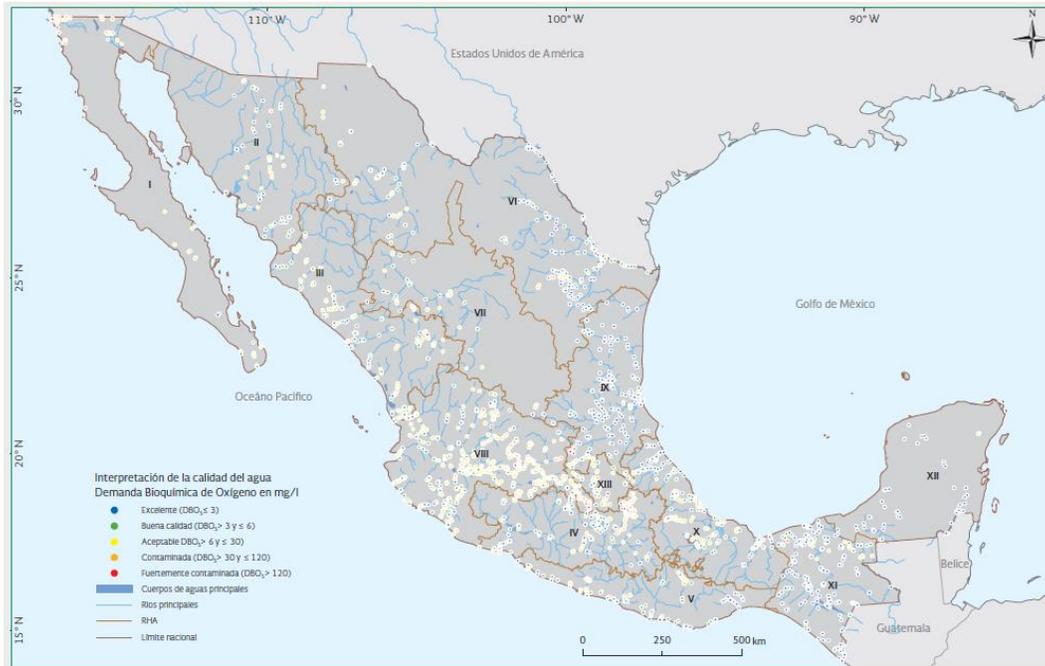


Figura 4. Calidad del agua según indicador  $DBO_5$  (CONAGUA, 2016)

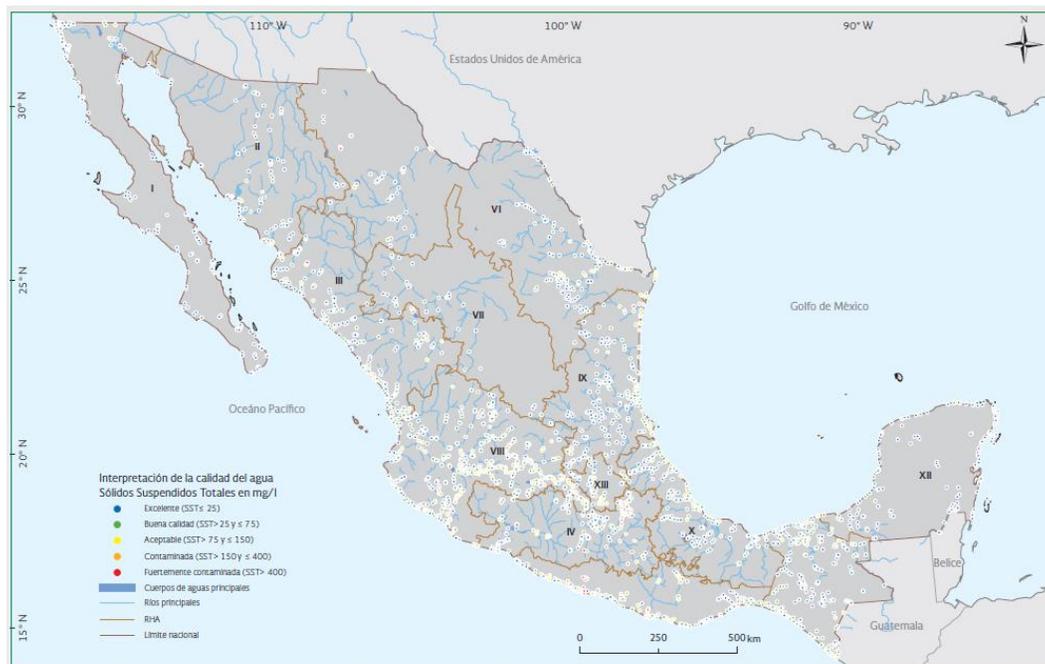


Figura 5. Calidad del agua según indicador DQO (CONAGUA, 2016)

Tabla 5. Comparación de índices de calidad

| Tabla I. PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS EMPLEADOS POR DIFERENTES Índices de Calidad del Agua |               |                |                   |      |               |
|---|---------------|----------------|-------------------|------|---------------|
| País  | México (1992) | Estados Unidos |                   |      | Unión Europea |
| índice  | ICA           | ICA-NSF        | ICA <i>Darius</i> | DQWI | UWQI          |
| Parámetro   |               |                |                   |      |               |
| OD  | x             | x              | x                 |      | x             |
| pH  | x             | x              | x                 | x    | x             |
| DBO   | x             | x              | x                 |      | x             |
| Nitratos  | x             | x              | x                 | x    | x             |
| Coliformes fecales  | x             | x              | x                 |      |               |
| Temperatura   |               | x              | x                 |      |               |
| Turbiedad   | x             | x              |                   |      |               |
| Sólidos disueltos totales   | x             | x              |                   |      |               |
| Fósforo total   | x             |                |                   |      | x             |
| Cadmio  |               |                |                   | x    | x             |
| Mercurio  |               |                |                   | x    | x             |
| Conductividad   | x             |                | x                 |      |               |
| Sólidos suspendidos   | x             |                |                   |      |               |
| Color   | x             |                | x                 |      |               |
| Nitrógeno total   | x             |                |                   |      |               |
| Cloruros  | x             |                | x                 | x    |               |
| Plomo   |               |                |                   | x    |               |
| Cromo total   |               |                |                   | x    |               |
| Arsénico  |               |                |                   | x    | x             |

Fuente: Pérez et al, 2014

Como puede observarse, los indicadores usados actualmente en México sólo dan una idea cualitativa, y optimista, de la calidad del agua, y ello sin considerar la escasa frecuencia del monitoreo. Puede darse el caso, y de hecho a ocurrido, que aguas contaminadas por algún metal, como plomo o arsénico, sean consideradas de buena calidad, cuando de facto son un riesgo para la salud. Cuando se emplea un criterio más estricto, emerge un panorama de la calidad del agua muy distinto. En la figura 3 se presenta el análisis publicado por UNESCO (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), 2017) de la situación de la calidad del agua en el mundo, en la que, como puede observarse, al aplicar un criterio internacional de contaminación de la DBO<sub>5</sub>, muchos de los ríos en México se muestran con contaminación grave.

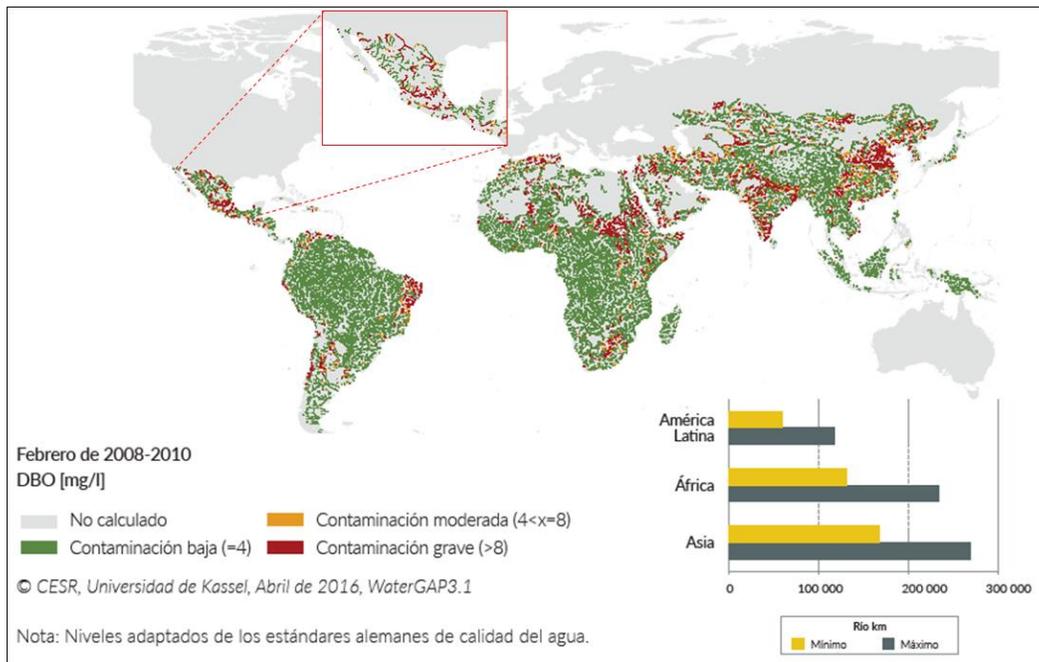


Figura 6. Estimaciones de las concentraciones de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en cursos de agua. Resultado de México por los autores (WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas), 2017).

La situación de contaminación actual de los cuerpos de agua en México, tanto al bajo porcentaje de aguas residuales tratadas en México, como al bajo nivel de tratamiento exigido.

Es evidente que, mientras mayor sea la demanda de agua, la generación de aguas residuales será cada vez mayor. Uno de los mayores desafíos hídricos en muchos países del planeta y en México es la calidad del agua, que se encuentra aunada a la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales. Las Naciones Unidas en su informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos menciona la gran preocupación de las descargas de aguas residuales de todo tipo y su bajo nivel de tratamiento con consecuencias perjudiciales para la salud humana, la productividad económica, la calidad de los recursos ambientales de agua dulce y los ecosistemas. De alta preocupación son las descargas de aguas residuales industriales (WWAP, 2017). De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016d), del total de agua residual generada se colecta el 91.5%, lo que se traduce en un caudal de 212 m<sup>3</sup>/s, de aguas residuales municipales, del cual se tratan 120.9 m<sup>3</sup>/s, es decir el 57%. Esto significa que, del total de aguas residuales generadas, se da tratamiento solamente al 52%, asumiendo que el tratamiento sea el adecuado y se cumpla con la normatividad vigente para descarga y no altere al cuerpo receptor o que cumpla con la calidad para una determinada reutilización. En relación con las aguas residuales industriales, la cobertura de tratamiento es aún menor (70.5 m<sup>3</sup>/s).

En el año 2015, la industria trató 70.5 m<sup>3</sup>/s de aguas residuales, en 2 832 plantas en operación a nivel nacional. La tabla 6 ilustra los principales niveles de tratamiento utilizados a nivel industrial. Como se puede observar, muchos sistemas de tratamiento sólo implementan tratamientos primarios y secundarios, siendo estos niveles insuficientes pues quedan sin remoción una serie de compuestos recalcitrantes, y no normados

en este momento (Plaguicidas, fármacos, antibióticos, etc.), genéricamente denominados como contaminantes emergentes.

**Tabla 6. Principales procesos de tratamiento para las aguas residuales industriales.**

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

### Servicios de agua

En lo que se refiere a los usos del agua, la mayor parte del agua extraída, el 76.3% se utiliza en la agricultura, el 14.6% en abastecimiento público, el 4.8% en la generación de energía y el 4.3% en la industria autoabastecida<sup>1</sup>.

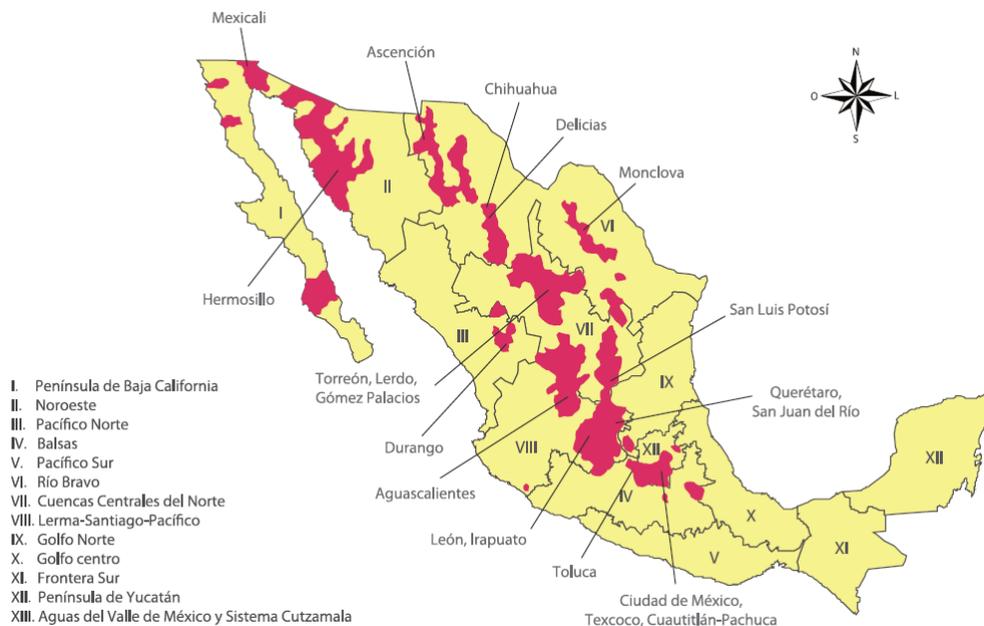


Figura 7. Acuíferos sobreexplotados en México (en color rojo) y principales centros urbanos (Domínguez Mora, y otros, 2012).

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

En México existen 85 distritos de riego, con una superficie total de 3.5 millones de hectáreas, y alrededor de 40,000 unidades de riego con una superficie de 3 millones de hectáreas, parte de las cuales se siembran en dobles cultivos. No obstante, debido a razones diversas, entre ellas la escasez de agua, raramente se siembra y cosecha la superficie total de 6.5 millones de hectáreas. En el ciclo agrícola 2014-2015, por ejemplo, se sembró una superficie de 3.92 millones de hectáreas en unidades de riego, de las que se cosecharon 3.796; mientras que en los distritos de riego se sembraron 2.962 millones de hectáreas y se cosecharon 2.951. La superficie sembrada de un año a otro depende en gran medida de las condiciones climáticas, y se reduce considerablemente durante los periodos de sequía, como se muestra en la figura 8, en la que se observan claramente los efectos de las sequías del periodo 2000-2004.

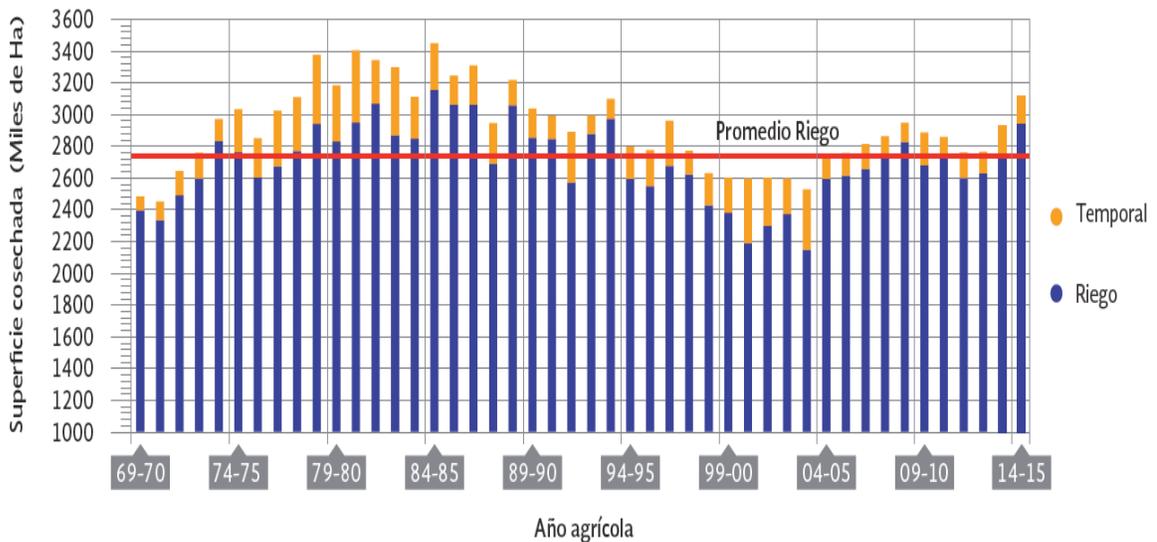


Figura 8. Superficie histórica de riego en los distritos de riego en México (CONAGUA, 2016c).

La eficiencia del uso del agua de riego en los distritos de riego de México es muy baja. De acuerdo con (Peña-Peña, 2007), la eficiencia media de conducción es de 64.7%, la de conducción interparcelaria de 75% y la de aplicación en parcela del 70%, lo que conduce a una eficiencia global de apenas 34.9%. Es decir, se pierde el 65.1% del agua extraída de las fuentes para este fin.

En lo que hace a la cobertura nacional de agua potable en 2010 resultó, de acuerdo con la CONAGUA, en 95.59% en zonas urbanas y 75.69% en zonas rurales, para un promedio nacional de 90.94. Como resultado, la cobertura es muy diversa entre los municipios de México, como puede observarse en la figura 9. En los municipios con mayor grado de pobreza la cobertura se encuentra en el rango de 0 a 60%, lo que incluye grandes superficies de los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Veracruz, Oaxaca y Guerrero.

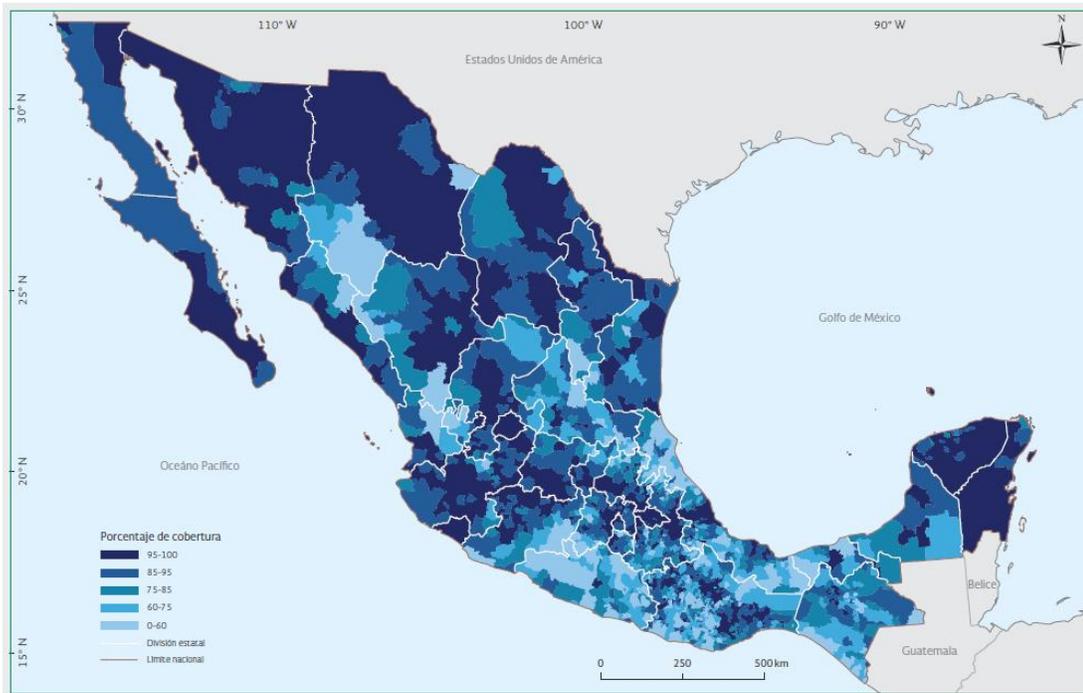


Figura 9. Cobertura de agua potable por municipio 2010 (CONAGUA, 2016).

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

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

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

Uno de los mayores desafíos hídricos en México es la calidad del agua, que se encuentra aunada a la baja cobertura de tratamiento de aguas residuales. Como ya se ha citado, de acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2016d), del total de agua residual generada se colecta el 91.5%, lo que se traduce en un caudal de 212 m<sup>3</sup>/s, del cual se tratan 120.9 m<sup>3</sup>/s, es decir el 57%. Esto significa que, del total de aguas residuales generales, se da tratamiento solamente al 52%.

Por otra parte, de acuerdo con reportes del INEGI, solo 34% de los 2,457 municipios y delegaciones del país, cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales (INEGI, 2017). La mayor parte de las descargas de aguas residuales sin tratamiento se realizan en ríos y arroyos, canales y en el suelo o barrancas. Como resultado, los cuerpos de agua en México tienen una muy baja calidad no solo considerando los parámetros básicos con los que la CONAGUA clasifica la calidad de los cuerpos de agua, sino muchos otros parámetros no normados y procedentes de descargas de aguas industriales o de drenajes agrícolas

## 4. LOS RETOS DE LA SEGURIDAD HÍDRICA EN MÉXICO

En la figura 10 se muestran, de manera esquemática, los principales retos para alcanzar la seguridad hídrica, que se analizarán de manera particular para México. Estos desafíos se manifiestan principalmente en la escasez de agua, el deterioro ambiental de cuencas y acuíferos, la contaminación de los cuerpos de agua, los efectos adversos de los eventos hidrometeorológicos extremos y los crecientes conflictos por el agua.

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



Figura 10. Retos de la seguridad hídrica y principales factores desencadenantes (adaptado de Martínez-Austria P. F., 2013).

## Factores demográficos: crecimiento de la población y urbanización

La población mundial, hacia el año 2050, será de 9,550 millones de personas, es decir 3,423 más que al inicio del siglo. Este incremento, por sí solo, aumentará sustancialmente las necesidades hídricas de la sociedad, no sólo para el uso directo humano, sino también para la producción de alimentos, energía, servicios y usos industriales. En el caso de México, la población estimada en 2050 será de 143.925 millones de personas, esto es 43.965 millones de personas más que al inicio del siglo XXI (United Nations, 2011).

Por otra parte, el proceso de urbanización, que se ha estabilizado en los países desarrollados, continuará en los países en desarrollo, como prevé la División de Población de las Naciones Unidas. La proporción de la población mundial que habita en zonas urbanas se incrementará notablemente, pasando de 46.6 % en el año 2000 a 66.4 % en el año 2050. Prácticamente la totalidad de la nueva población urbana se concentrará en las ciudades de los países menos desarrollados. La población rural, en cambio, registrará un descenso entre 2011 y 2050.

En el caso de México, la proporción de la población urbana ya era muy alta en el año 2000, 74.7%, y continuará creciendo hasta alcanzar el 86.4% en el año 2050. En la figura 11 se muestran las tendencias y proyecciones de población en México, de acuerdo a la actualización 2011 de la División de Población de las Naciones Unidas (United Nations, 2011). En un siglo, de 1950 a 2050, la población de México habrá aumentado de 27.9 a 143.925 millones de habitantes. El crecimiento en zonas urbanas en ese periodo será de 11.886 a 123.952 millones de personas. La población rural habrá crecido de 15.98 a 19.974 millones de personas. De hecho, se espera que la población rural disminuirá de 25.267 millones de habitantes en el año 2000 a 19.974 en el 2050. De estos datos se desprende que, aun cuando el abastecimiento rural posee su propia problemática, los retos mayores se ubicarán en los centros urbanos.

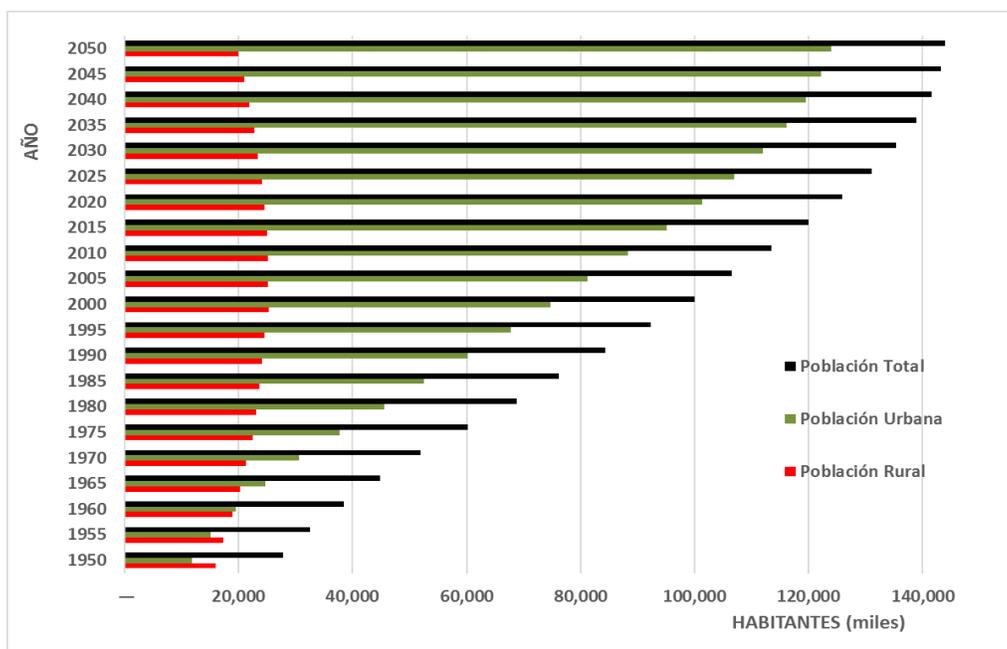


Figura 11. Población rural y urbana 1950-2050 en México (con datos de United Nations, 2011)

Esta nueva población urbana en México, adicionalmente, se asentará en los principales centros urbanos. De las 186,316 localidades actualmente existentes en México, el 48% de la población se ubica en 65 centros urbanos. Sin embargo, en solamente 36 localidades se ubica el 28% de la población. Esta tendencia continuará aumentando. Los principales problemas, que ya se observan y se verán agravados, se encuentran en las grandes ciudades y megalópolis, principalmente las de la ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla.

El caso mejor estudiado es el del valle de México. En esta región hidrológica los recursos hídricos se encuentran ya gravemente sobreexplotados: La extracción del acuífero es de  $59 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras que la recarga natural es de solamente  $32 \text{ m}^3/\text{s}$  (Aguirre Díaz, 2012), lo que significa una sobreexplotación de 46%. Aún así, para cubrir la demanda total, estimada en  $83 \text{ m}^3/\text{s}$ , se deben importar recursos hídricos de otras cuencas por  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  (Ardavín Ituarte, 2013), como se muestra en la figura 12. La sobreexplotación de los acuíferos en el Valle de México ocasiona otros graves problemas, el más importante el de la subsidencia, que hace que el suelo de la Ciudad de México se hunda a una tasa promedio de  $10\text{cm}/\text{año}$ , con valores mucho más altos en algunos sitios, como el Valle de Chalco, donde la tasa de subsidencia alcanza valores de  $60 \text{ cm}/\text{año}$  (Arreguín Cortés, 2012). Evidentemente, la ciudad de México y su zona metropolitana es una región altamente no sustentable.

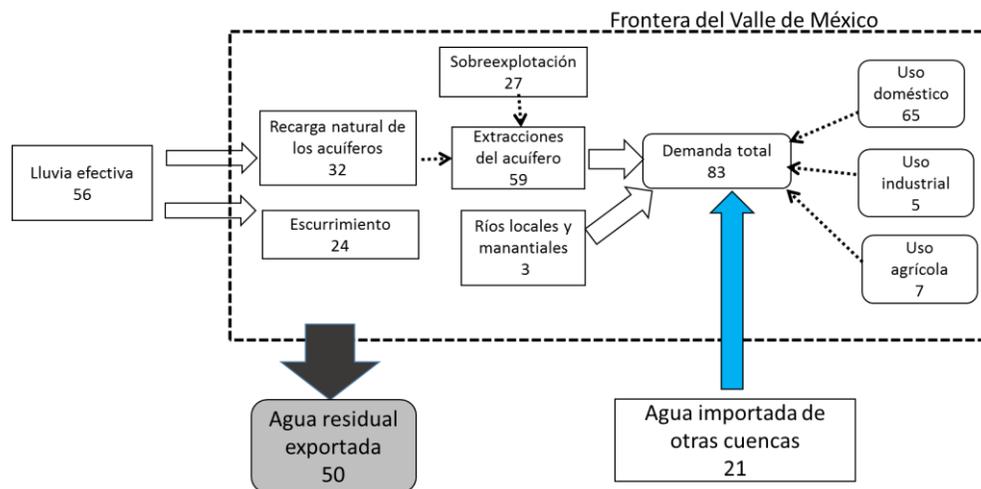


Figura 12. Balance hídrico del Valle de México, cifras en  $\text{m}^3/\text{s}$  (adaptada de Martínez-Austria & Bandala, 2015).

Otro caso relevante, para citar uno de los más importantes, aunque menos conocidos, es el de la zona metropolitana de la ciudad de Monterrey. Esta región urbana comprende los municipios de Monterrey, San Nicolás de los Garza, Ciudad Apodaca, San Pedro Garza García, Guadalupe, Ciudad Santa Catarina, Ciudad General Escobedo y Ciudad Benito Juárez. La población total de esta megalópolis era de 3'669,115 habitantes en 2010, y crecerá a 4'579,536 para 2030 (con datos de <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>), en tan solo veinte años. En el año 2010, la disponibilidad de agua para abastecimiento se encuentra en balance, es decir que la oferta de agua es suficiente para cubrir las necesidades de la población actual, pero se deben buscar nuevas fuentes para abastecer a los nuevos 910 421 habitantes previstos en el periodo. Las fuentes locales, sin embargo, no son suficientes por lo que serán necesarios trasvases, lo que está provocando una controversia nacional y la oposición de los habitantes donde se ubican las nuevas fuentes potenciales.

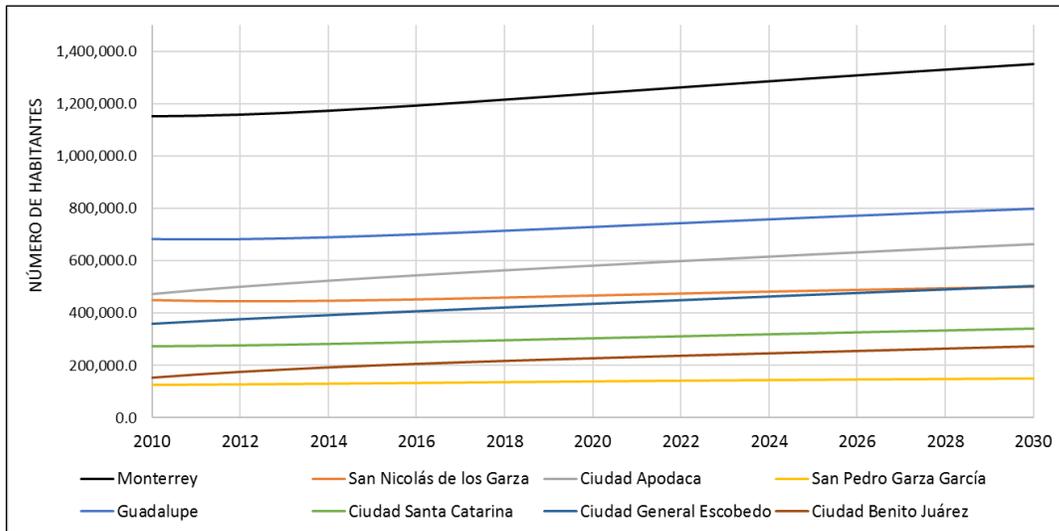


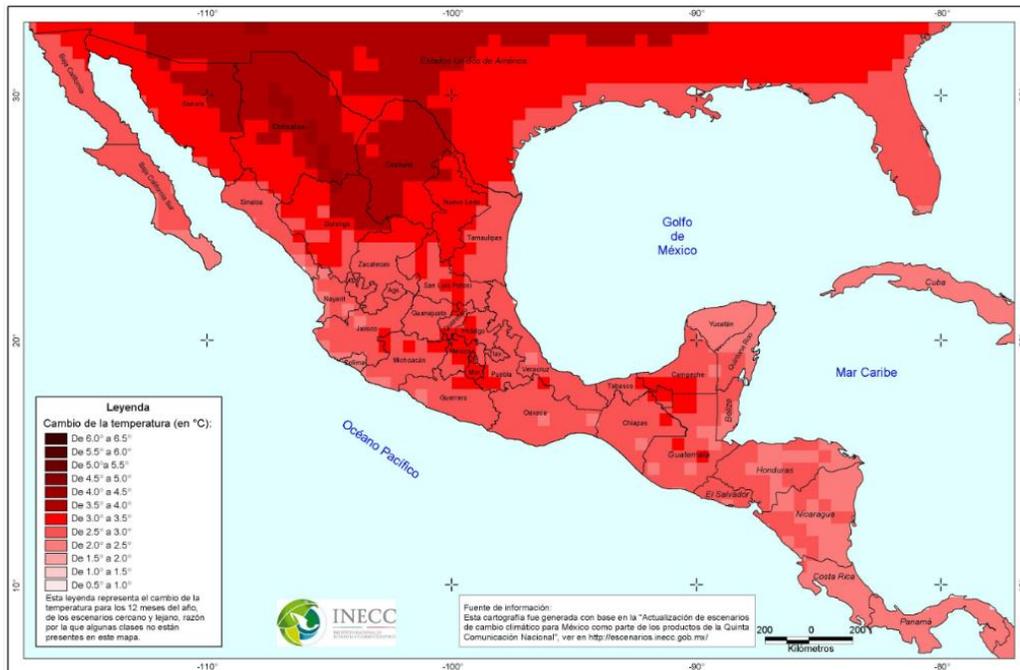
Figura 13. Crecimiento poblacional en los municipios de la megalópolis de Monterrey (elaborada con información del Consejo Nacional de Población (con datos de <http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Proyecciones>)).

Muchos de los grandes centros urbanos se ubican en zonas en las cuales ya se sobreexplotan los recursos o se efectúan trasvases. Tal es el caso de las zonas metropolitanas de la Ciudad de México, de la ciudad de Monterrey, N.L.; de Ciudad Juárez, Chih., Torreón, Coah., León, Gto., Querétaro, Qro.; Toluca, Edo. Mex., entre otras. Cada uno de los casos debe analizarse en particular, pues las soluciones dependen del contexto y condiciones locales.

## Cambio Climático y Riesgos Hidrometeorológicos

El cambio climático, cuya principal manifestación en la mayor parte del planeta son incrementos en la temperatura, es una realidad no solamente pronosticada con la mejor ciencia de que dispone el ser humano, sino que sus primeros efectos ya están siendo observados en muchas regiones.

En cuanto a la temperatura, los escenarios más actuales de cambio climático pronostican incrementos muy importantes de la temperatura en México. En las figuras 14 y 15 se muestran las temperaturas esperadas en los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 (INECC, 2016) para el periodo 2075-2099. De acuerdo con el primer escenario, la temperatura media aumentará entre 2 y 4 °C, mientras que, en el segundo, el aumento será de entre 3 y 5.5 °C. Estos cambios en la temperatura media tendrán grandes efectos en los recursos hídricos, cambiando la demanda hídrica tanto del medio ambiente como de los usos agrícola y urbano, principalmente. Desde luego, no son solamente importantes los cambios anuales, sino los que ocurrirán en los diversos meses del año: un incremento de 4 °C en la temperatura media de agosto, como se espera en el escenario RCP 6.0, tendrá significativos efectos en la salud, debido a que este es el mes más caluroso del año.



Figura

14. Cambio en la temperatura promedio anual, según escenario RCP 6.0, 2075-2099 (INECC, 2016)



Figura 15. Cambio en la temperatura promedio anual, según escenario RCP 8.5, 2075-2099 (INECC, 2016)

Los cambios esperados en la precipitación para los mismos escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 para el periodo 2075-2099 se muestran en las figuras 16 y 17. En el escenario más desfavorable son de esperar reducciones en la precipitación de entre 20 y 30% en la zona norte de México, en la que se encuentra la mayor superficie de riego en México.

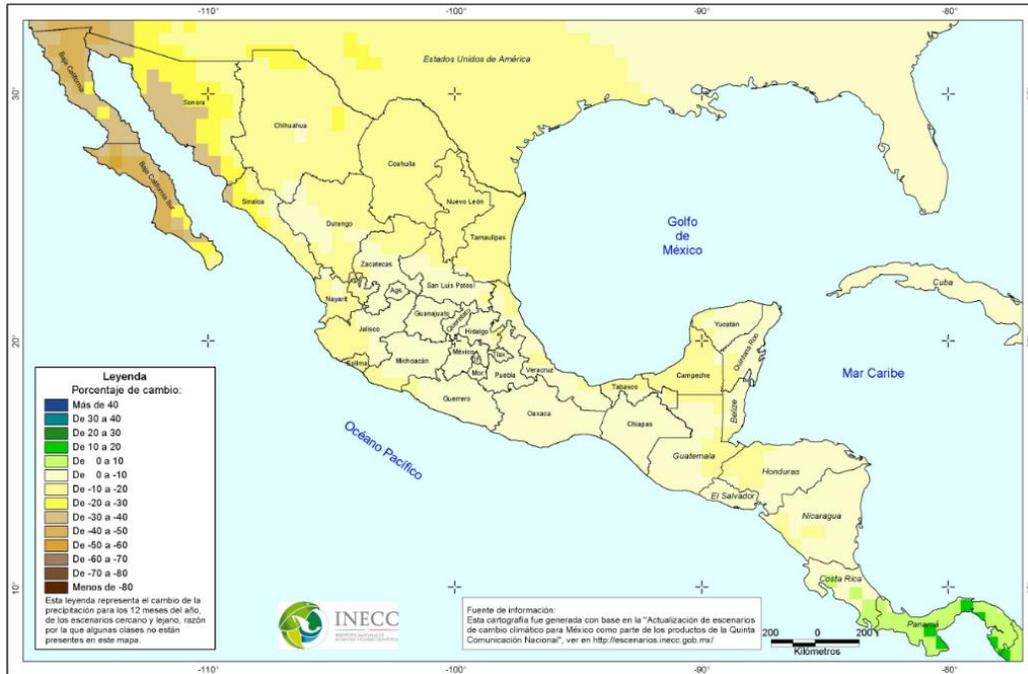


Figura 16. Cambios esperados en la precipitación. Escenario RCP 6.0, 2075-2099 (INECC, 2016)



Figura 17. Cambios esperados en la precipitación. Escenario RCP 8.5, 2075-2099 (INECC, 2016)

El efecto combinado de una menor precipitación, que disminuirá en una proporción mayor la disponibilidad natural superficial y subterránea, y de una mayor demanda de agua ocasionada por el aumento en la temperatura, producirá un mayor desbalance y escasez de agua, principalmente en las regiones donde ya ocurre y se suma a los efectos del crecimiento poblacional y la urbanización.

Por otra parte, la atención sobre los efectos del cambio climático se ha centrado principalmente en los efectos que éste tendrá sobre los promedios de las variables climáticas, es decir, por ejemplo, el cambio en la temperatura o la precipitación promedio anual. Sin embargo, en una atmósfera y un océano con mayor energía, son de esperar fenómenos extremos más intensos, principalmente ondas de calor más frecuentes con máximos mayores, precipitaciones extremas o sequías con mayor recurrencia e intensidad y tormentas de mayor magnitud que desencadenarán graves efectos en la salud humana (Moeller, 2014).

El número y costo de los desastres naturales relacionados con el agua ha registrado un continuo incremento en las últimas décadas (UNESCO, 2009), como se muestra en la figura 18. Como puede observarse, en especial desde 1990, el número de desastres ha registrado un incremento constante en lo que se refiere a inundaciones y efectos de vientos. (Glokany, 2009) ha realizado un estudio de las tendencias en el número de desastres relacionados con el clima, durante el último siglo. El resultado es poco alentador, como se muestra en la figura 19, que hace evidente su crecimiento exponencial.

Como es del dominio público, México sufre año con año por los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos extremos. Entre los más recientes, una sequía de más de dos años de duración en el norte de México en el periodo 2011-2013, e inundaciones catastróficas en el centro y sur de México, en ambos litorales, en septiembre de 2013. Desafortunadamente, las pérdidas humanas son cada vez mayores, así como las pérdidas económicas, que alcanzan ya decenas de miles de millones de pesos anuales, sin contar los efectos nocivos del retraso al desarrollo económico y social de muchas regiones.

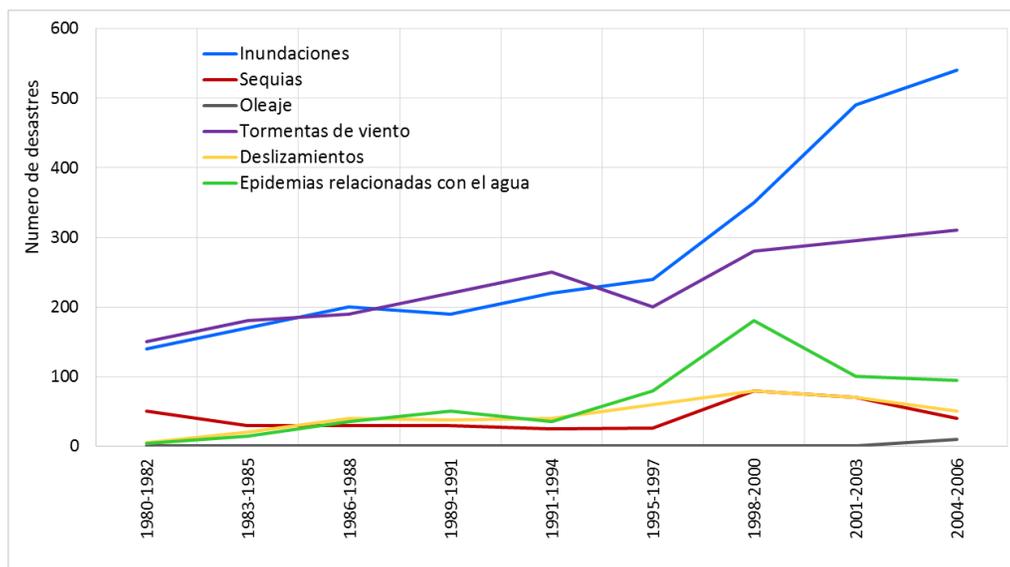


Figura 18. Desastres relacionados con el agua, registrados en el periodo 1980-2006 (Datos de UNESCO, 2009).

Las precipitaciones extremas, con sus efectos nocivos como inundaciones y deslizamientos de tierra, ocasionan no sólo enormes pérdidas de infraestructura y al sector productivo, sino inclusive pérdidas de vidas humanas y con frecuencia revierten años de progreso. En consecuencia, entre los mayores retos a la seguridad hídrica de México se encuentra la protección contra inundaciones. En el año 2010 solamente, el costo de los daños ocasionado por fenómenos hidrometeorológicos extremos ascendió a 82,540 millones de pesos. En Nuevo León, los daños del huracán Alex representaron el 2.45% del PIB del estado, y en Veracruz

las inundaciones ocasionadas por las tormentas Karl y Matthew ocasionaron daños equivalentes al 4.8% del PIB estatal; en ese año 739 municipios del país recibieron declaratoria de desastre natural por eventos hidrometeorológicos (CENAPRED, 2012). En el año 2007, la mayor parte del estado de Tabasco sufrió inundaciones, con enormes costos económicos y sociales. Desafortunadamente, como se aprecia en la figura 20, el número de decesos y el costo de los daños en México se han ido incrementando continuamente en los años recientes.

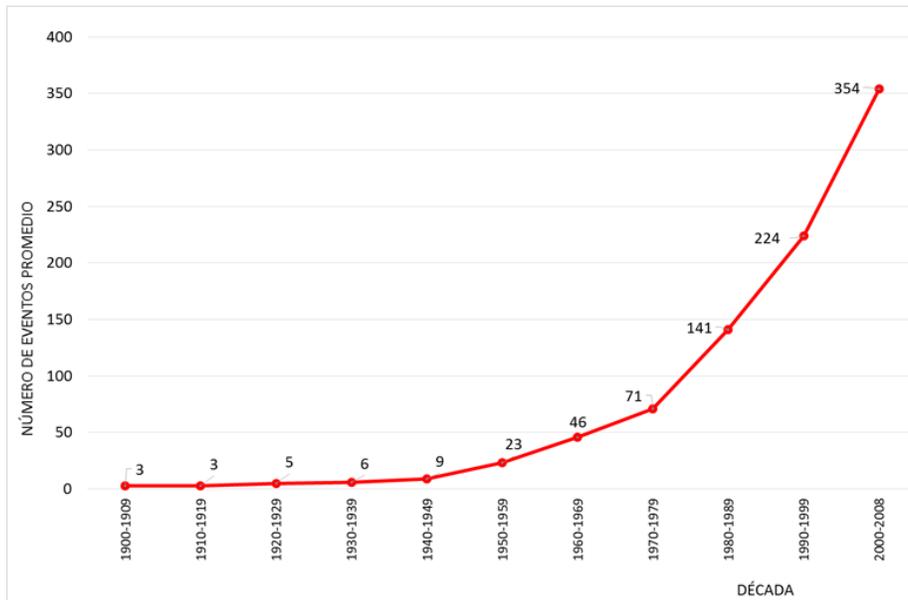


Figura 19. Número anual promedio de desastres relacionados con el clima por década (con datos de Glokany, 2009).

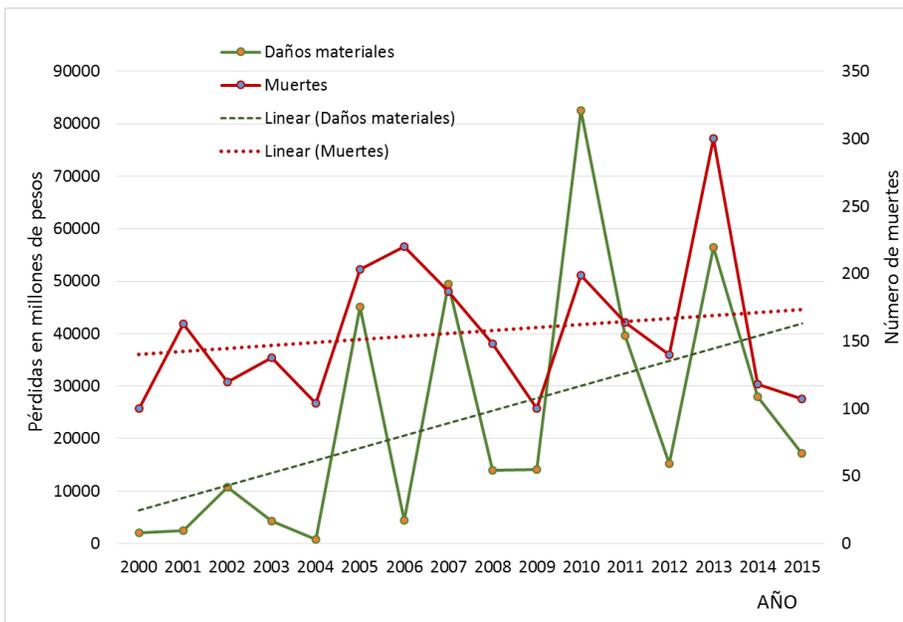


Figura 20. Daños en México por desastres hidrometeorológicos (elaborada con datos de reportes CENAPRED).

La sequía, en particular, es el evento hidrometeorológico que ocasiona daños económicos y sociales más extensos. A la sequía que se asocian fenómenos como migración climática y daños al medio ambiente, incluidos algunos permanentes como la desertificación. Su frecuencia e intensidad, presumiblemente por efectos del cambio climático, se ha incrementado también desde 1970 a la fecha, y es causa del mayor número de muertes entre los fenómenos climáticos extremos. De acuerdo con datos de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, 2014), de los diez desastres naturales relacionados con el clima hidroclimáticos registrados en el periodo 1970-2012, cuatro fueron sequías, y produjeron 650,000 muertes.

De acuerdo con (FAO, 2013), “desde 1900 han muerto más de 11 millones de personas como consecuencia de la sequía, y más de 2,000 millones se han visto afectados, más que en cualquier otro riesgo físico”.

Si bien los incrementos observados en los precios de los alimentos son el resultado de un proceso multifactorial, tanto por cambios en la demanda como en la oferta de alimentos, las sequías registradas en 2007-2008 en algunos países productores de granos actuaron como un disparador de los precios, que durante 2008 experimentaron un fuerte incremento (ver Trostle, 2008 y Mitchel, 2008). En un mundo con precios volátiles de los alimentos, como ha ocurrido especialmente en el último lustro y parece ser una tendencia permanente, la ocurrencia de sequías extensas tiene el potencial de producir importantes aumentos en los precios con el consecuente efecto negativo en la población de los países menos desarrollados, que invierten aproximadamente la mitad de sus ingresos en alimentación.

Por otra parte, de acuerdo con diversos investigadores, la duración e intensidad de las sequías se ha visto incrementada, en especial a partir de 1940 (Dai, 2011). En México, estudios con sequías reconstruidas de los últimos 600 años muestran que el país, además de sequías regionales de corta duración, registra megasequías con una periodicidad de alrededor de 50 y 100 años (Cerano-Paredes, y otros, 2009), como se puede observar en la Figura 21.

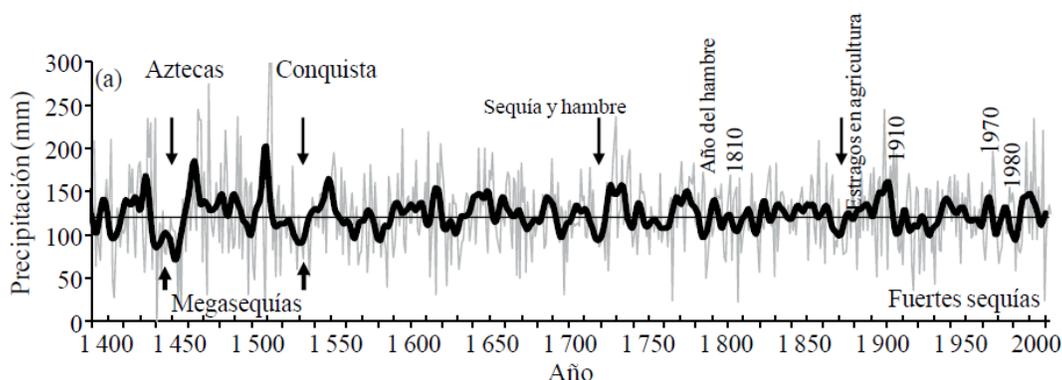


Figura 21. Variabilidad de precipitación en el Noroeste de México en los últimos seiscientos años (Cerano-Paredes, y otros, 2009).

Las más recientes sequías que han afectado a México, la primera entre 2003 y 2006, y la segunda entre 2010 y 2013 han sido particularmente intensas. En la figura 22 se ilustra el porcentaje del territorio nacional bajo condiciones de sequía del año 2003 al 15 de septiembre de 2017 (SMN, 2017). Es de destacar mayo de 2011, en el cual el 93% del territorio mexicano padecía algún grado de sequía.

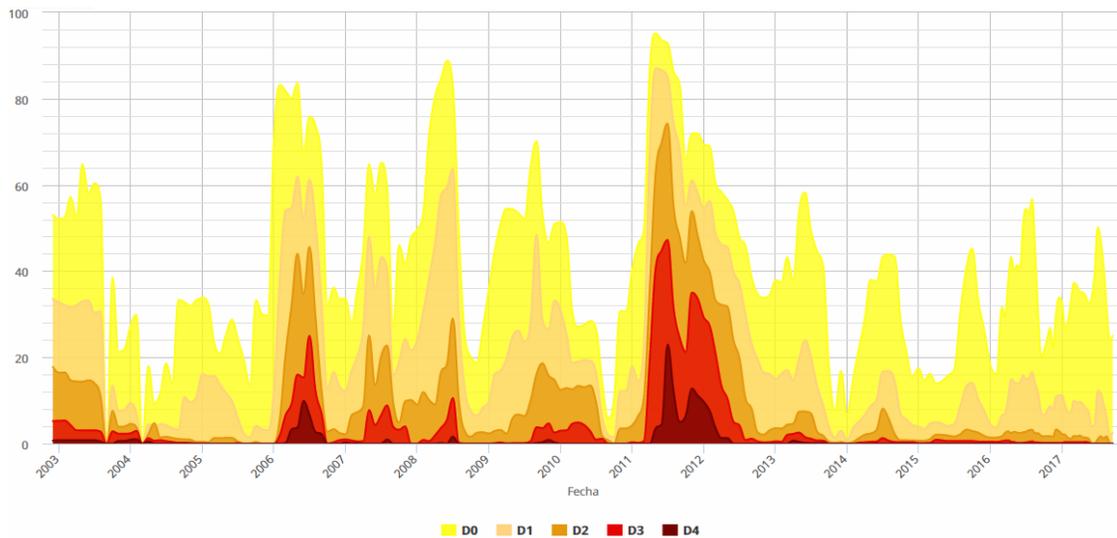


Figura 23. Porcentaje de la superficie de México afectada por sequías entre enero de 2003 y el 15 de septiembre de 2017 (SMN, 2017).

Otro de los impactos mayores de las sequías se produce en el medio ambiente, con pérdidas en la biodiversidad. Se reconoce a la sequía como una de las principales causas de la desertificación, lo que supone cambios permanentes en la biodiversidad, en la productividad de los suelos y, en general, en la ecología de grandes regiones.

## Gobernanza del agua

Como se ha dicho anteriormente, uno de los factores desencadenantes de la inseguridad hídrica es la débil y frágil gobernanza del agua.

La comprensión del concepto de gobernanza, o gobernabilidad como se traduce a veces el inglés governance, se encuentra aún en desarrollo y por tanto sujeto a amplio debate. De hecho, diversos investigadores suelen distinguir entre gobernabilidad, como proceso de fortalecimiento de la capacidad del Estado para implementar políticas públicas y la aplicación de la ley; y gobernanza, que incorpora la participación en todo el proceso del Estado, sociedad y empresa para resolver problemas comunes.

En este texto se empleará el término “gobernanza hídrica”, con el sentido más comúnmente aceptado, propuesto por la Asociación Global del Agua (GWP por sus siglas en inglés) (Rogers & Hall, 2003), y que ha sido adoptado por la OCDE (Akhmouch, 2012), entre otras organizaciones:

*La gobernanza del agua hace referencia al conjunto de sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos implementados para el desarrollo y gestión de los recursos hídricos y la provisión de servicios de saneamiento en los diferentes niveles de la sociedad.*

La gobernanza hídrica supone entonces la existencia de políticas públicas claras, un marco jurídico adecuado, así como sistemas de participación social e instituciones apropiadas y con las capacidades

necesarias. Supone también la coordinación entre los diversos actores y en los diferentes ámbitos territoriales, un concepto que la OCDE traduce como “governabilidad multinivel”.

La OCDE propone analizar la situación política administrativa en la que está inmersa la gestión del agua, a través de la gobernanza multinivel (OECD, 2011), misma que es definida como “la distribución explícita o implícita de la autoridad, de la responsabilidad y el desarrollo e implementación de las políticas en los diferentes niveles administrativos y territoriales, es decir, i) a través de los diferentes ministerios u organismos públicos a nivel del gobierno central (superior horizontal); ii) entre las diferentes capas de gobierno en los niveles locales, regionales, provinciales/estatales, nacionales y supranacionales (verticalmente), iii) a través de los diferentes actores a nivel sub-nacional (inferior horizontal)”. Asimismo, mediante el Análisis de Brechas, ofrece a los tomadores de decisiones y a los diseñadores de políticas una metodología que posibilita la identificación de deficiencias -brechas- de implementación, mediante el análisis de grandes temas clave que, desde la óptica del analista, deben considerarse para mejorar la gestión del agua.

Con esta metodología es posible identificar las entidades políticas, las visiones e intereses, las normas, leyes y reglamentos; describiendo el marco político administrativo en el que está inmersa la gestión de los recursos hídricos.

Con esta metodología, la (OECD, 2011) define los principales retos para la gobernanza hídrica. Entre ellos, los más significativos para México son la brecha fiscal, es decir la divergencia entre las responsabilidades de los actores públicos y los recursos disponibles; la fragmentación de responsabilidades entre los diversos niveles de gobierno (brecha política); falta de incentivos institucionales para la coordinación horizontal y vertical, así como brechas importantes de información. Mención especial merece la brecha de rendición de cuentas, que se manifiesta en la falta de reportes de la acción pública y la carencia de mecanismos políticos y sociales de supervisión. Estas brechas se muestran en la tabla 7 y que no requieren mayor comentario, pues son suficientemente explícitas.

**Tabla 7. Brechas de gobernanza multinivel en el sector agua en México.**

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

Fuente: OCDE, 2013.

<sup>2</sup> Además de la insuficiencia de capital humano especializado en el área.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

A pesar de los avances en infraestructura de abastecimiento, tratamiento de aguas y reducción de riesgos; según lo planteado en este texto, se desprende un panorama que muestra la necesidad de una profunda reforma del sector hídrico en México, que debe abarcar desde aspectos de gobernanza, en particular aspectos legales e institucionales, aspectos de financiamiento del sector, formación de capital humano, nuevas obras ambientalmente amigables, y hasta la modificación de políticas públicas que, pese a las inversiones realizadas, no han sido capaces de detener y revertir la tendencia a una menor seguridad hídrica en México. Esta reforma debe ser discutida y acordada socialmente, no obstante, se pueden señalar algunas medidas necesarias y urgentes.

En materia de abastecimiento de agua potable y saneamiento, es urgente la revisión de las políticas de tarifas y subsidios, que han conducido a la mayoría de los organismos operadores a una situación precaria, en la que difícilmente se cubren los costos de operación, y no son posibles las inversiones necesarias en ampliación y conservación de las obras.

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

Sin duda son indispensables estudios locales sobre vulnerabilidad al cambio climático, con las consecuentes acciones de adaptación e incremento de la resiliencia.

Es indispensable revisar, mejorar y hacer operativos los sistemas de participación pública en la toma de decisiones, para ello, será necesario que la información del agua en México esté efectivamente disponible a todos los usuarios. Pero aún más importante es que la información existente sea organizada y diseñada para dar respuestas en diferentes niveles de toma de decisión y ésta sea utilizada para tal efecto.

Algunas alternativas para la reducción de impactos en las aguas subterráneas pueden incluir estrategias de ahorro de agua en la producción de alimentos, con mejoras en la tasa de aprovechamiento del agua a través de la tecnificación del riego, y siembra de cultivos altamente resistentes a estrés hídrico, mayor valor nutritivo y económico, pero sobre todo respetando aspectos culturales y ambientales para que ello pueda ser implementado y sustentable.

La eficiencia del uso de agua en agricultura, en el mundo y particularmente en México, es precaria y se estima entre un 35 -50 %, por lo que sin duda una de las prioridades es la modernización y tecnificación de sistemas de riego y monitoreo de variables climáticas asociadas en tiempo real. Así, uno de los retos importantes para el país es incrementar su producción agrícola reduciendo su explotación de agua y en particular la subterránea. Para ello habrá que modificar políticas públicas nacionales que inhiben la gestión del recurso hídrico, tales como un costo nulo por m<sup>3</sup> de agua empleado en agricultura, y probablemente reorientando este tipo de subsidios a la cadena de producción-venta de la actividad agrícola mexicana.

Una alternativa factible para la reducción de la sobreexplotación de los acuíferos y cuerpos de agua superficiales, es la reutilización, en la agricultura, de las aguas residuales tratadas, cuidando el cumplimiento de los estándares de calidad para preservar la salud y minimizar los riesgos de enfermedad y de salinización de suelos y efectos negativos sobre los cultivos agrícolas.

Adicionalmente habrán de generarse mejoras en la generación de políticas públicas nacionales que favorezcan el fortalecimiento de: a) capital humano calificado en el área; b) Inversión en ciencia y tecnología hídrica; c) procesos de planeación estratégica participativa con enfoque de GIRH; d) Diseño de información para la toma de decisiones; y e) reducción de falta transparencia y rendición de cuentas.

Finalmente se subraya que en la aplicación de todas estas recomendaciones, debe escucharse la opinión de expertos independientes, provenientes de la academia, e involucrar, con los recursos económicos y humanos necesarios, a las universidades en los temas prioritarios a investigar en el tema

## 6. Referencias

- Aguirre Díaz, R. (2012). Principales retos del sistema de aguas de la ciudad de México. En C. V., El gran reto del agua en la ciudad de México. México: Sistema de aguas de la ciudad de México.
- Akhmouch, A. (2012). Water governance in Latin America and the Caribbean: a multilevel approach. OCDE.
- Ardavín Ituarte, J. (2013). Programa de sustentabilidad hídrica en el Valle de México. México: Comisión Nacional del Agua.
- Arnell, N. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economical scdenarios. *Global Environ. Change* (14), 31-52.
- Arnell, N. W. (1999). Climate change and global water resources. *Global Environ. Change*, 9, S31-S49.
- Arreguín Cortés, F. I. (2012). Uso estratégico del acuífero. En V. Calvo, El gran reto del agua en la ciudad de México. México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- Bakker, K., & Allen, D. (2015). Canadian Water Security Assessment Framework: Tools for assessing water security and improving watershed governance. Canadian Water Network.
- Brown, A., & Matlock, M. D. (2011). A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies White Paper #106. University of Arkansas. The Sustainability Consortium.
- Cerano-Paredes, J., Villanueva-Díaz, J., G., A.-Á. J., Sánchez-Cohen, I., Valdez-Cepeda, R. D., & García-Herrera, G. (2009). Reconstrucción de 350 años de precipitación para el suroeste de Chihuahua, México. *Madera y Bosques*, 15(2), 27-44.
- CENAPRED. (2012). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres.
- CNA. (2010). Estadísticas del agua en México. Edición 2010. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 27 de septiembre de 2017, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2010-16Junio2010.pdf>
- CONAGUA. (2010). Agenda del Agua en México. México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016). Atlas del Agua en México 2016. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA. (2016b). Estadísticas del Agua en México. Edición 2016. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 27 de septiembre de 2017, de [https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/03/Estadisticas-del-Agua-en-Mexico\\_2016.pdf](https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/03/Estadisticas-del-Agua-en-Mexico_2016.pdf).
- CONAGUA. (2016c). Estadísticas agrícolas de los distritos de riego 2014-2015. México: Subdirección General de Infraestructura Hidroagrícola.
- CONAGUA. (2016d). Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Edición 2016. México: Comisión Nacional del Agua.
- Cortés, J. (2012). Contaminantes emergentes: aspectos químicos, microbiológicos y de salud. En G. Moeller, G. Buelna, & (editores), Contaminantes emergentes; su importancia, retos y perspectivas sobre la medición, tratamiento y la reglamentación. Jiutepec: IMTA.

Cortés, J. E., Calderón Molgora, A., Dominguez Espino, M., Gelover, S., Hernandez, M., & Moeller, G. (2013). Endocrine disruptors in water sources: human health risks and EDS removal through water treatment alternatives. *International perspectives on water quality management and pollution control*, 1, 35.

Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Climate Change*, 2(1), 46-65.

Dalin, C., Wada, Y., Kastner, T., & Puma, M. (2017). Groundwater depletion embedded in international food trade. *Nature*, 543, 700-717.

Domínguez Mora, R., Jiménez Cisneros, B., Kaufer, M., Martínez Austria, P., Montesillo Cedillo, J., Palerm Viqueira, J., . . . Zapata Martelo, E. (2012). Los recursos hídricos de México. Situación y Perspectivas. En B. Jiménez Cisneros, & J. Galizia Tundisi (Edits.), *Diagnóstico del Agua en las Américas*. (págs. 309-357). Mexico: Academia Mexicana de Ciencias.

Esteller, M., Rodríguez, M., Cardona, A., & Padilla-Sánchez, L. (2012). Evaluation of environmental changes due to intensive aquifer overexploitation: case studies from Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 184, 5725-5741.

FAO. (2013). Drought. Recuperado el 19 de september de 2013, de FAO Land and Water Division: <http://www.fao.org/docrep/017/aq191e/aq191e.pdf>

Flores-Márquez, E., Jiménez-Suarez, G., Martínez-Serrano, R., & Silva-Pérez, D. (2006). Study of geothermal water intrusion due to groundwater exploitation in the Puebla Vallery aquifer system, Mexico. *Hydrogeology Journal* (15), 1216-1230.

Florke, M., & Alcamo, J. (2007). Assessment of global scale water stress indicators. En J. Lozán, H. Grassl, P. Hupfer, M. L., & C. Schönwiese, *Wissensechaftliche Auswertungen* (pág. 384). Hamburg.

Fonseca, C. R., Esteller, M. V., & Díaz-Delgado, C. (2013). Territorial approach to increased energy consumption of water extraction feom depletion of a highlands Mexican aquifer. *Journal of environmental management* (128), 920-930.

Glokany, I. M. (2009). Deaths and detah rates from extreme weather events: 1900-2008. *Journal of American Physicians and Surgeons*, 14(4), 102-109.

Heller, L. (2017). Declaración final del relator especial sobre los derechos humanos al agua y saneamiento. Oficina del Alto Comisionado de los derechos Humanos. Naciones Unidas. Obtenido de [http://www.hchr.org.mx/index.php?option=com\\_k2&view=item&id=967:declaracion-de-final-de-mision-del-relator-especial-sobre-los-derechos-humanos-al-agua-y-al-saneamiento-sr-leo-heller&Itemid=281](http://www.hchr.org.mx/index.php?option=com_k2&view=item&id=967:declaracion-de-final-de-mision-del-relator-especial-sobre-los-derechos-humanos-al-agua-y-al-saneamiento-sr-leo-heller&Itemid=281)

Huntjens, P., Lebel, L., Pahl-Wostl, C., Camkin, J., Schulze, R., & Kranz, N. (2012). Institutional design propositions for the governance of adaptation to climate change in the water sector. *Global Environ. Change* (22), 67-81.

INECC. (13 de noviembre de 2016). Escenarios de cambio climático. Recuperado el 7 de junio de 2017, de INECC Cambio Climático: <http://escenarios.inecc.gob.mx/>

INEGI. (17 de marzo de 2017). Comunicado de prensa núm. 127/17. En México, sólo 34 de cada 100 municipios cuentan con servicio de tratamiento de aguas residuales municipales. Aguascalientes.

La Vigna, F., Ciadamaro, S., Mazza, R., & Mancini, L. (2010). Water quality and relationship between superficial and groundwater in Rome (Aniene river basin, central Italy). *Environmental Earth Sciences*, 60(6), 1267-1279.

Llamas, R., & Custodio, E. (2003). Intensive use of groundwater. Challenges and oportunities. Lisse: Balkema.

Martínez-Austria, P. F. (noviembre-diciembre de 2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, IV(5), 165-180.

Martínez-Austria, P. F., & Bandala, E. (2015). Issues and challenges for water supply, storm water drainage and wastewater treatment in Mexico City Metropolitan area. En I. Barajas Aguilar, J. K. Mahlkecht, M. Kjellen, A. Mejía-Betancourt, & editors, *Water and cities in Latin America. Challenges for sustainable development*. (págs. 109-125). London: Routledge.

Mejía, J., Rodríguez, R., Armienta, A., Mata, E., & Fiorucci, A. (2007). Aquifer vulnerability zoning, and indicator of atmospheric pollutants input? Vanadium in the Salamanca aquifer, Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 185(1-4), 95-100.

Mitchel, D. (2008). A note on rising food prices. World Bank. doi: 10.1596/1813-9450-4682

Moeller, G. (2014). Patógenos emergentes y reemergentes en agua. En P. Tello, P. Nijaylova, & G. Ruiz, *Temas de ingeniería sanitaria y ambiental: visión de exepertos de América Latina y el Caribe*. (Vol. 1, pág. 359).

Moeller, G., Buelna, G., & (editors). (2012). *Contaminantes emergentes: Su importancia, retos y perspectivas sobre la medición, tratamiento y reglamentación*. Jiutepec, Morelos, México: IMTA.

OCDE. (2013). *Making water reform happen in Mexico*. Paris: OECD studies on water.

OECD. (2011). *Water governance in OECD countries: a multilevel approach*. Paris: OECD Studies on Water.

Pahl-Wostl, C., Palmer, R., & Richard, K. (2013). Enhancing water security for the benefits of human and nature-the role of governance. *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 5(6), 676-684.

Peña-Peña, E. (julio de 2007). Eficiencias del uso del agua en distritos de riego en México. *Gaceta del IMTA*(3). Recuperado el 29 de septiembre de 2017, de <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g03-07-2007/eficiencias-uso-agua.html>

Pérez-Flores, L. S., Rodríguez Narváez, O. M., Gutiérrez Estrada, R. d., & Martínez-Austria, P. (2014). Índices de calidad del agua: un comparativo entre México, Estados Unidos y la Unión Europea. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica. Puerto Vallarta, México: Asociación Mexicana de Hidráulica.

Re, V., Cissé-Faye, S., Faye, A., Faye, S., Gaye, C., Sachi, E., & al, e. (2011). Water quality decline in coastal aquifers under anthropic pressure: the case of a suburban area of Dakar (Senegal). *Environmental monitoring and assessment*, 605-622.

Rekacewicz, P. (2006). *Water Stress Index*. Recuperado el 18 de 08 de 2017, de <https://www.grida.no/resources/5586>

Rogers, P., & Hall, A. W. (2003). *Effective water governance*. Technical paper No. 7. Global Water Partnership.

Saavedra Horita, J. R., Rodríguez Varela, J. M., & Hansen Rodríguez, M. P. (2016). *Indicadores de gestión prioritarios en organismos operadores*. Jiutepec, Morelos.: Instituto Mexicano de Tecnología del agua.

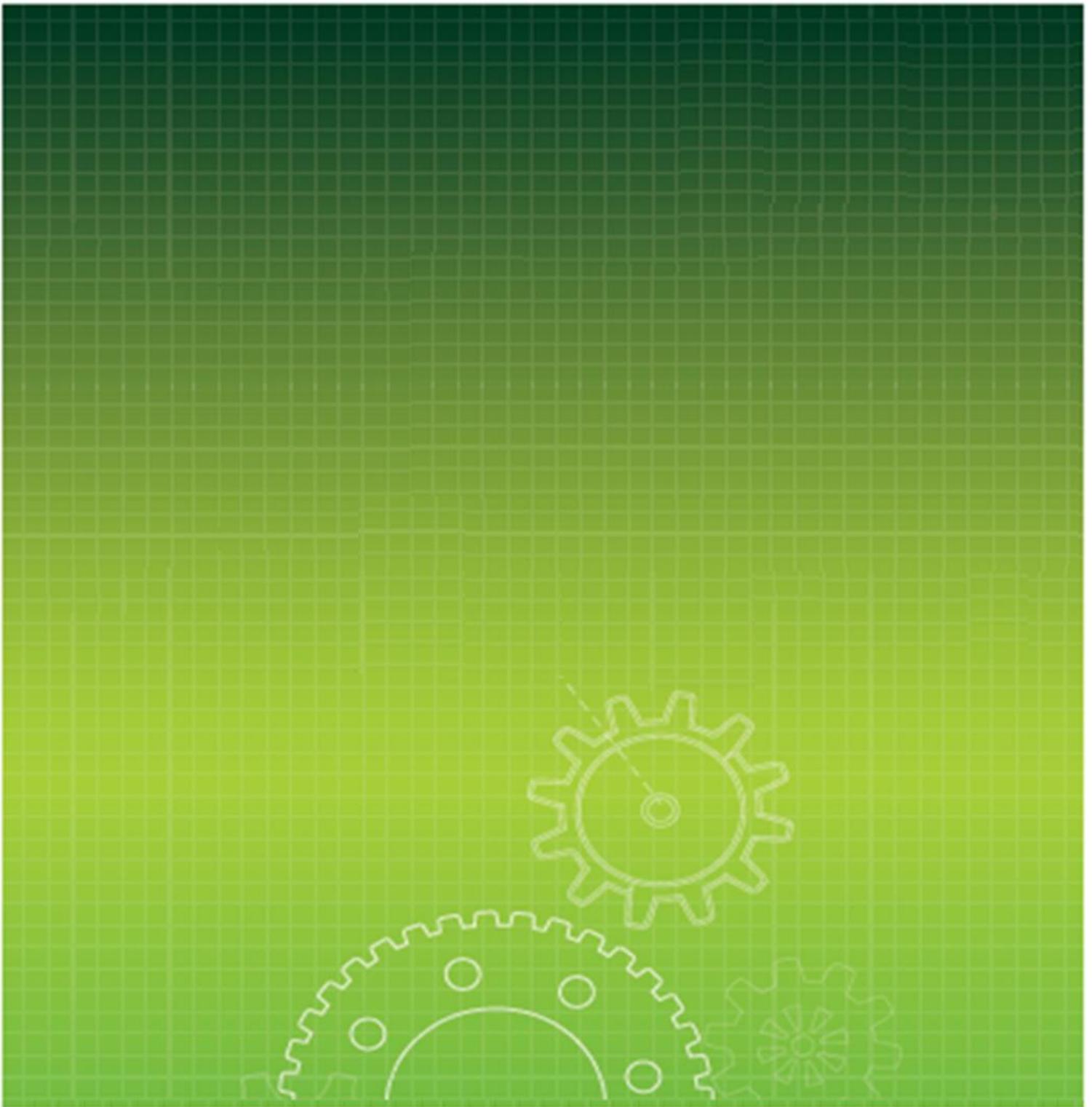
Simmers, I., Villarroya, F., & Rebollo, L. (1992). *Selected papers on aquifer overexploitation*. Hannover: Heinz Heise.

- Smakhtin, V., Revenga, C., & Döll, P. (2004). Taking into account environmental water requirements in global scale-water resources assessment. (CGIAR, Ed.) Colombo, Sri Lanka: Comprehensive Assessment Secretariat, CGIAR.
- SMN. (2017). Monitor de sequía en México. Recuperado el 29 de septiembre de 2017, de Servicio Meteorológico Nacional: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Solomon, S. (2010). Water. The epic struggle for wealth, power, and civilization. HarperCollins .
- Tanigushi, M., Masuhara, N., & Burnett, K. (2017). Water, energy and food security in the Asia Pacific region. *Journal of Hydrology: Regional Studies*(11), 9-19.
- Trostle, R. (2008). Global agricultural supply and demand: factors contributing to recent increase in food commodity prices. USDA.
- UNDP. (2006). Human Development Report 2006. Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis. New York: United Nations Development Programme.
- UNESCO. (2009). Global Trends in water-related disasters: an insight for policymakers. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- United Nations. (2011). World Urbanization Prospects: the 2011 Revision. United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- UN-Water. (2013). Water Security and the Global Water Agenda. Ontario, Canada: United Nations University.
- US NIC. (2011). Global trends 2030: alternative worlds. US NIC. Washington D.C.: US NIC (United National Intelligence Council).
- Vrba, J. (2003). The impact of aquifer intensive use on groundwater quality. En R. Llamas, & E. Custodio, Intensive use of groundwater. Challenges and opportunities (págs. 113-132). Lise: Balkema.
- Water Resources Group. (2009). Charting our water future. Economic Frameworks to inform decision-making. 2030 Water Resources Group.
- World Economic Forum. (2011). Water Security. The wate-food-energy climate nexus. London: Island Press.
- World Economic Forum. (2017). The Global Risks Report 2017. Geneva: World Economic Forum.
- World Meteorological Organization. (2014). Atlas of mortality and economic losses from weather, climate and water extremes (1970-2012). Geneva.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). (2017). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017. Paris: UNESCO.









TACUBA No. 5 CENTRO HISTÓRICO, DELEGACIÓN CUAUHTÉMOC, C.P. 06000, CIUDAD DE MÉXICO  
TEL. 5521 6790 • 5521 4404 • 5518 4918

 [academiadeingenieria@ai.org.mx](mailto:academiadeingenieria@ai.org.mx)  [www.ai.org.mx](http://www.ai.org.mx)  
 @AingenieriaMex  Academia de Ingeniería  Academia de Ingeniería

