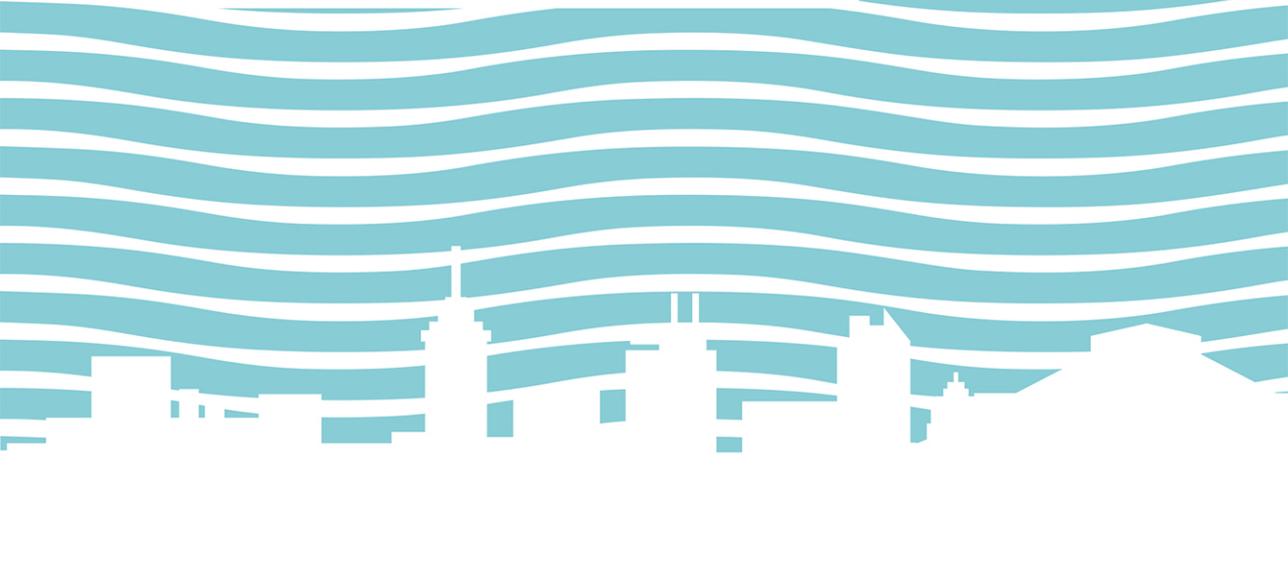




CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA EN CIUDADES

**IMPACTOS EN LA
CIUDAD DE MÉXICO**

ASPECTOS CIENTÍFICOS
Y POLÍTICAS PÚBLICAS



**GLORIA SOTO MONTES DE OCA
MARINA HERRERA PANTOJA**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

DR. RODOLFO RENÉ SUÁREZ MOLNAR
RECTOR DE LA UNIDAD CUAJIMALPA

DR. ÁLVARO JULIO PELÁEZ CEDRÉS
SECRETARIO DE LA UNIDAD

MTRA. MÓNICA JIMÉNEZ SÁNCHEZ
COORDINADORA DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

MTRO. CARLOS FRANCISCO GALLARDO SÁNCHEZ
JEFE DE PUBLICACIONES

CAMBIO CLIMÁTICO Y AGUA EN CIUDADES

**IMPACTOS EN LA
CIUDAD DE MÉXICO**

ASPECTOS CIENTÍFICOS
Y POLÍTICAS PÚBLICAS

**GLORIA SOTO MONTES DE OCA
MARINA HERRERA PANTOJA**

Cambio climático y agua en ciudades: impactos en la Ciudad de México. Aspectos científicos y políticas públicas / Gloria Soto Montes de Oca, Marina Herrera Pantoja. – Ciudad de México: UAM, Unidad Cuajimalpa, 2019.

159 p.; il. byn, gráficas, mapas, tablas. – 22 cm.

ISBN: 978-607-28-1742-5

1. Cambios climáticos – Aspectos políticos – Ciudad de México.
2. Abastecimiento de agua – Aspectos políticos – Ciudad de México.
3. Ciudad de México – Clima. 4. Meteorología – Investigaciones – Ciudad de México. 5. Desarrollo de recursos hidrológicos – Ciudad de México.

Soto Montes de Oca, Gloria
Herrera Pantoja, Marina, coaut.

Dewey: 363.73874097253 S68 2020 LC: QC903.2.M59 S68 2020

Esta obra fue dictaminada positivamente por pares académicos mediante un esquema que preserva el anonimato mutuo y fue evaluada para su publicación por el Consejo Editorial de la Rectoría de la UAM Unidad Cuajimalpa.

Primera edición, 2019

D. R. © 2019, de esta edición:
Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Cuajimalpa
Av. Vasco de Quiroga 4871, col. Santa Fe Cuajimalpa
Alcaldía Cuajimalpa de Morelos
C. P. 05348, Ciudad de México
www.cua.uam.mx

ISBN: 978-607-28-1742-5

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio, electrónico o mecánico, sin el consentimiento por escrito de los titulares de los derechos.

HECHO EN MÉXICO / MADE IN MEXICO

Índice

| | |
|---|----|
| Índice de tablas | 7 |
| Índice de figuras | 9 |
| Lista de siglas y acrónimos | 11 |
| Introducción | 13 |
| | |
| 1. Cambio climático y agua: adaptación y resiliencia en ciudades | 17 |
| Entendiendo el fenómeno de cambio climático | 17 |
| El cambio climático en ciudades | 21 |
| Resiliencia al cambio climático | 23 |
| Medidas de adaptación en la gestión del agua | 26 |
| Tipos de adaptación y políticas públicas ante el cambio climático | 31 |
| | |
| 2. Vulnerabilidad hídrica de México frente al cambio climático | 37 |
| Efectos del cambio climático en México | 37 |
| Vulnerabilidad asociada a la gestión del agua en México | 40 |
| Gestión del agua en las ciudades | 43 |
| Marco institucional en torno al cambio climático | 46 |
| | |
| 3. Características hídricas de la ZMCM | 49 |
| Antecedentes | 49 |
| Localización y clima de la ZMCM | 52 |
| Edafología y geología de la ZMCM | 52 |
| Acuífero de la ZMCM | 56 |

| | |
|---|-----|
| 4. Balance hídrico de la ZMCM | 61 |
| Tendencias climáticas de la ZMCM | 62 |
| Balance hídrico de la ZMCM | 64 |
| Disponibilidad de agua en la ZMCM | 70 |
| 5. Sistemas de abasto y drenaje de agua de la ZMCM: vulnerabilidad y resiliencia | 75 |
| Riesgos en la disponibilidad del agua | 76 |
| Vulnerabilidad del acuífero | 80 |
| Sectores vulnerables de la población | 82 |
| Sistema tarifario: equidad, eficiencia y financiamiento | 85 |
| El sistema de drenaje y las inundaciones | 87 |
| 6. Los impactos del cambio climático en el balance hídrico de la ZMCM | 91 |
| Escenarios de emisiones de GEI | 92 |
| Modelos de circulación global | 96 |
| Impactos en el balance hídrico de la ZMCM | 97 |
| Incertidumbre en los escenarios de cambio climático | 103 |
| 7. Posibles impactos del cambio climático en la Ciudad de México | 107 |
| Impactos del clima en el consumo doméstico desde un enfoque teórico | 108 |
| Impactos probables en la demanda de agua para uso doméstico de la ZMCM | 109 |
| Impactos por el cambio en la precipitación | 114 |
| Opciones de política pública para mejorar la resiliencia de la ciudad | 125 |
| Conclusiones | 131 |
| Glosario | 133 |
| Bibliografía | 139 |

Índice de tablas

- 19 **Tabla 1.** Cambio en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) durante el periodo 1750-2016
- 28 **Tabla 2.** Oportunidades de adaptación en zonas urbanas
- 38 **Tabla 3.** Eventos por inundaciones en México
- 53 **Tabla 4.** Tipos de suelos de la Ciudad de México y su capacidad de infiltración
- 58 **Tabla 5.** Unidades hidroestratigráficas en el acuífero de la ZMCM
- 68 **Tabla 6.** Capacidad de infiltración por tipo de suelo de la ZMCM
- 69 **Tabla 7.** Variación del crecimiento de la mancha urbana en la ZMCM; incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México y nueve municipios del Estado de México
- 72 **Tabla 8.** Series de tiempo promedio anual de T max, T min, T me, P, AE y Hrx para la zona urbana de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990
- 73 **Tabla 9.** Series de tiempo promedio anual de T max, T min, T me, P, AE y Hrx para la zona de conservación de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990
- 76 **Tabla 10.** Volumen disponible para la ZMCM
- 77 **Tabla 11.** Volúmenes anuales de agua entregados de fuentes locales y federales
- 81 **Tabla 12.** Indicadores para los acuíferos de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca, $\text{Mm}^3 \text{a}^{-1}$
- 83 **Tabla 13.** Colonias afectadas por tandeos en la Ciudad de México

-
- 93** **Tabla 14.** Las cuatro trayectorias de concentración representativas
-
- 95** **Tabla 15.** Proyecciones del intervalo probable de cambio de temperatura media global del aire en la superficie para finales del siglo XXI de acuerdo con el cuarto y quinto informes de evaluación del IPCC
-
- 98** **Tabla 16.** Características demográficas, sociales, económicas y tecnológicas de los escenarios A1B y B1
-
- 103** **Tabla 17.** Volúmenes de escurrimiento para la zona norte y volúmenes de recarga para la zona sur calculados para el periodo histórico 2046-2085 correspondientes a los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 109** **Tabla 18.** Consumo bimestral de agua en la Ciudad de México para uso doméstico (2007-2013)
-
- 110** **Tabla 19.** Aumento promedio de la temperatura (°C)
-
- 113** **Tabla 20.** Modelo de regresión del consumo doméstico de agua
-
- 114** **Tabla 21.** Valores promedio de la precipitación (mm), línea base 20C3m y escenarios
-
- 116** **Tabla 22.** Volúmenes de descargas al drenaje en m^3s^{-1}
-
- 117** **Tabla 23.** Eventos de inundaciones en la ZMCM, 2016 y 2017
-
- 126** **Tabla 24.** Inversiones necesarias para reducir la vulnerabilidad de la región en materia de agua

Índice de figuras

- 38 **Figura 1.** Grado de peligro por sequía a escala municipal
- 41 **Figura 2.** Inundaciones en la ciudad de Querétaro durante septiembre de 2017
- 51 **Figura 3.** Mapa de la ZMCM que muestra el área de conservación y el área de desarrollo urbano
- 57 **Figura 4.** Delimitación del acuífero de la ZMCM
- 60 **Figura 5.** Corte transversal del acuífero de la ZMCM
- 63 **Figura 6.** Tendencia de la temperatura media anual en la zona urbana de la ZMCM en el periodo histórico 1961-1990
- 63 **Figura 7.** Tendencia de la temperatura media anual en la zona de conservación de la ZMCM en el periodo histórico 1961-1990
- 64 **Figura 8.** Variación de la precipitación media anual en la zona urbana de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990
- 65 **Figura 9.** Variación de la precipitación media anual en la zona de conservación de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990
- 65 **Figura 10.** Frecuencia de la intensidad de los eventos de precipitación en la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990
- 78 **Figura 11.** Volúmenes de agua por tipo de fuente
- 86 **Figura 12.** Precios del agua para uso doméstico en la Ciudad de México y Monterrey (pesos por m³)
- 90 **Figura 13.** Áreas de riesgo en la ZMCM
- 94 **Figura 14.** Comparación de las concentraciones de CO₂ proyectadas para los escenarios RCP3-PD / 2.6,

RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, B1, A1B, A2 y A1F1

-
- 99** **Figura 15.** Temperatura promedio mensual (°C) del periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones A1B y B1, comparado con la línea base (20c3m), de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 100** **Figura 16.** Anomalía de precipitación en el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 101** **Figura 17.** Precipitación media mensual en el periodo 2046-2085 simulado para los escenarios de emisiones A1B y B1, comparado con la línea base (20c3m), de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 101** **Figura 18.** Porcentaje de cambio en el número de eventos extremos de precipitación para el periodo 2046-2085 correspondiente a los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 102** **Figura 19.** Porcentaje de cambio en la precipitación promedio anual (P), evaporación potencial (AE) y precipitación efectiva (Hxr) para el periodo 2046-2085, correspondiente a los escenarios de emisiones A1B y B1, de acuerdo con el modelo GFDLCM2
-
- 111** **Figura 20.** Comparativo del consumo promedio bimestral (m³) entre el periodo observado 2007-2013 y el consumo estimado mediante modelo de regresión
-
- 113** **Figura 21.** Consumo promedio bimestral (m³) simulado para la ZMCM, periodo base 20c3m y periodo 2046-2085, en los escenarios de emisiones A1B y B1
-
- 123** **Figura 22.** Mapas de eventos de inundación/encharcamientos en 2015-2017

Lista de siglas y acrónimos

AOGCM

Modelo de circulación global acoplado de la atmósfera y el océano (por sus siglas en inglés)

°C

Grados Celsius

Cepal

Comisión Económica para América Latina y el Caribe

CH₄

Metano

CO₂

Bióxido de carbono

Conagua

Comisión Nacional del Agua

GCMS

Modelos climáticos globales (por sus siglas en inglés)

GEI

Gases de efecto invernadero

gw/h

Gigawatts por hora

ha

Hectárea

INECC

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

Inegi

Instituto Nacional de Estadística y Geografía

IPCC

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés)

km²

Kilómetros cuadrados

m

Metros

MCGS

Modelos de circulación global

m³

Metros cúbicos

mm

Milímetros

mm a⁻¹

Milímetros al año

mm/24 hrs

Milímetros en 24 horas

Mm³

Millones de metros cúbicos

m³s⁻¹

Metros cúbicos por segundo

mm día⁻¹

Milímetros al día

msnm

Metros sobre el nivel del mar

mw

Megawatts

mwh

Megawatts por hora

NO_x

Óxidos nitrosos

O₃

Ozono troposférico

ppb

Partes por billón

PIB

producto interno bruto

ppm

Partes por millón

Sacmex

Sistema de Aguas de la Ciudad de México

Semarnat

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Sener

Secretaría de Energía

ZMCM

Zona metropolitana de la Ciudad de México

ZMVM

Zona metropolitana del Valle de México

Introducción

El entendimiento del clima como parte de un sistema global interconectado es cada día más importante. Los debates del cambio climático y sus efectos potenciales se han convertido en un tema de conversación entre el público en general debido a que cada año millones de personas en todo el mundo son afectadas por desastres provocados por eventos naturales extremos, como huracanes, sequías, olas de calor, inundaciones y tornados (Guha-Sapir *et al.*, 2016). Muchos de estos desastres son atribuidos al cambio climático, que se ha convertido en uno de los principales desafíos del siglo XXI (Gaillard *et al.*, 2005; IPCC, 2014). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial, 90% de los desastres a nivel mundial se halla asociado a eventos hidrometeorológicos, los cuales han mostrado un incremento de 100% en las últimas cuatro décadas (CRED, 2018).

El cambio climático está afectando tanto a los sectores productivos y sociales como a los propios ecosistemas (Smith y Katz, 2013; Barange *et al.*, 2014). Los impactos en el ciclo hidrológico son uno de los principales retos para la gestión del agua, especialmente en países en desarrollo donde el aumento de la población y la escasez del recurso hídrico han producido pérdida de cultivos y ganado, hambrunas, migración y riesgos a la seguridad humana (Kharraz *et al.*, 2012). Es de gran relevancia analizar la vulnerabilidad de las zonas urbanas al cambio climático porque en éstas viven más de 4 034 millones de personas, 54% de la población del mundo, y se proyecta que para el año 2030 las áreas urbanas concentrarán 60% de la densidad poblacional global (United Nations, 2016). Las ciudades en países en desarrollo no sólo aglutinan gran cantidad de habitantes, sino que con frecuencia presentan instituciones frágiles, servicios públicos ineficientes e infraestructura inadecuada (UN-Habitat, 2011). Por esta razón, los tomadores de decisiones y los ciudadanos deben conocer el riesgo que implica el cambio climático para tener la posibilidad de adaptarse a sus efectos y desarrollar una mayor resiliencia, entendida como la capacidad de recuperarse de eventos adversos.

Según autoridades nacionales, México presenta una alta vulnerabilidad a los impactos derivados del cambio climático, debido a que 68% de su población y 71% del producto interno bruto (PIB) están altamente expuestos a riesgos por eventos hidrometeorológicos (DOF, 2009). En particular, la zona metropolitana del Valle de México (ZMVM) es la mayor concentración urbana del país y una de las más grandes del mundo, con cerca de 25 millones de habitantes (Inegi, 2014). En su conjunto, consume $61 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ de agua y más de dos terceras partes del volumen distribuido se destinan para fines domésticos. Las fuentes de agua locales son insuficientes, por lo que una tercera parte del recurso se debe obtener de otras cuencas (SACM, 2012). La mala administración del vital líquido para cubrir la demanda de la población actual y las necesidades futuras, aunadas a las presiones potenciales del cambio climático, podrían poner en situación crítica a la ZMVM.

Algunos ejemplos de los impactos de eventos extremos de precipitación en dicha zona fueron presenciados en agosto de 2009, cuando el nivel de agua de una de las tres presas del Sistema Cutzamala registró su nivel más bajo en la historia reciente y, como resultado, el servicio de suministro de agua se redujo 30% durante varios fines de semana. Sin embargo, durante los meses de septiembre y octubre de ese mismo año (cuando generalmente se espera que las lluvias disminuyan), ocurrieron graves episodios de precipitaciones con intensidades superiores a 50 mm día^{-1} , las cuales causaron inundaciones severas que rompieron la sección de alcantarillado y provocaron el desbordamiento de los cuatro ríos que se utilizan para el transporte de las aguas residuales. Unos meses más tarde, en febrero de 2010, otros eventos de lluvias extremas con intensidades de 127 mm día^{-1} y 145 mm día^{-1} crearon una alerta regional, causando inundaciones que afectaron tanto la infraestructura pública como las zonas habitacionales, sobre todo en colonias de bajos ingresos (Luege-Camargo, 2011). En 2017 se registraron cuatro episodios de inundaciones que generaron caos regionales y provocaron incluso que una persona perdiera la vida, afectaciones a vehículos automotores, inundaciones de viviendas e infraestructura pública (CDMX, 2018). Es, por lo tanto, indispensable evaluar los posibles efectos que el cambio climático puede generar en los recursos hídricos de la ZMCM, para diseñar las acciones y las estrategias de adaptación que permitan el

manejo eficiente del recurso y también las acciones de protección civil necesarias para garantizar el bienestar y la seguridad de la sociedad.

Este libro aborda la problemática que enfrenta el manejo del agua en las grandes urbes en el contexto del cambio climático, en particular el caso de la Ciudad de México. El enfoque se centra en la importancia de considerar los cambios probables del clima con el objetivo de utilizar la información como un insumo para revisar las políticas públicas del agua en las ciudades. La discusión sobre la adaptación al cambio climático en el sector del agua en contextos urbanos es aún limitada. Muchas autoridades urbanas todavía no consideran el cambio climático en las políticas del manejo del agua, especialmente por el desconocimiento del tema y la debilidad institucional que caracteriza a muchos organismos operadores de agua en las ciudades. La presente obra desarrolla diferentes temas que explican por qué el cambio climático debe ser considerado en el manejo del agua en las ciudades, los conceptos relevantes para su análisis y el avance en los instrumentos de gobernanza útiles para su estudio. Se resalta la necesidad de integrar la actuación de las autoridades responsables del agua y el conocimiento científico para mejorar la toma de decisiones. En particular, se analizan los retos del manejo del referido recurso en un entorno de cambio climático en la ZMCM.

Su contenido busca ser una herramienta para los estudiantes de cualquier disciplina que deseen conectar los temas de cambio climático y la gestión del agua, así como para profesionistas que inciden en las decisiones relacionadas con el uso del recurso hídrico y la gobernanza de las ciudades. El libro se divide en siete capítulos. El capítulo uno presenta el tema del cambio climático y los efectos previsibles en el manejo del agua de las ciudades desde una perspectiva general. El capítulo dos brinda una explicación de los efectos esperados del cambio climático en México y las repercusiones en el manejo del agua, así como indicadores que muestran una situación de vulnerabilidad en la gestión del recurso a escala nacional. En el tercer capítulo se explican las principales características hídricas de la ZMCM, incluyendo el clima, la edafología, la geología y la hidrogeología. En el capítulo cuatro se expone el balance hídrico de la ZMCM, incluyendo aspectos climáticos y de disponibilidad del recurso. Tanto en este capítulo como en el capítulo seis se presenta información con un lenguaje especializado en hidrología y dentro de escenarios que

reflejan el cambio climático; sin embargo, los conceptos se explican de manera sencilla, pensando en aquellas personas que no son especialistas en la temática, además de que se incluyen en el glosario con el fin de facilitar su comprensión.

El capítulo cinco analiza el sistema de abasto de la ZMCM en términos de su resiliencia a fenómenos externos y la vulnerabilidad de sectores específicos de la población. El capítulo seis expone los posibles impactos del cambio climático en el sistema hidrológico a partir de los resultados de las simulaciones climáticas realizadas con los modelos de circulación global bajo dos escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): el A1B y el B1 para el periodo 2046-2085. El capítulo siete analiza los posibles impactos de los cambios en el clima sobre el sistema de abasto de agua, la disponibilidad del recurso, el sistema de drenaje y los riesgos de inundaciones en la ciudad. Finalmente, las conclusiones presentan un balance de los riesgos y las posibles oportunidades derivadas del cambio climático para el manejo de agua en la ZMCM.

1. Cambio climático y agua: adaptación y resiliencia en ciudades

Este capítulo presenta una descripción sobre el fenómeno de cambio climático y sus posibles impactos en el recurso del agua, enfatizando los efectos esperados en ciudades. Su objetivo es proporcionar una perspectiva general sobre aspectos relevantes, empíricos y teóricos, para el estudio del cambio climático en la gestión del agua en zonas urbanas. Esto supone entender el cambio climático considerando cómo se espera que el incremento en la temperatura global del planeta impacte el ciclo del agua sin olvidar la relevancia de los eventos meteorológicos extremos. La forma como las ciudades manejan actualmente sus recursos hídricos impactará su resiliencia ante los cambios que se presentarán en el futuro. De esta manera, es importante que los organismos operadores de agua implementen políticas de adaptación que reduzcan la vulnerabilidad de las ciudades.

Entendiendo el fenómeno de cambio climático

Desde mediados del siglo XIX, la temperatura promedio del planeta ha aumentado aproximadamente $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$), en promedio (IPCC, 2013; NASA/GISS, 2018). Los análisis de los registros climáticos y paleoclimáticos confirman que durante las últimas décadas se presentaron las temperaturas más altas del último milenio (CRU, 2017). La Convención

Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas define dicho fenómeno como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables”.¹

La atmósfera tiene diferentes funciones que permiten la vida de todos los seres vivos. En la troposfera, la primera capa a partir de la superficie, se encuentra una pequeña cantidad de GEI que representa apenas 0.5% del total de los gases presentes en la atmósfera. Gracias a esta diminuta proporción de GEI, la Tierra tiene una temperatura promedio de 15 °C que hace el clima propicio para la vida. Es interesante saber que la ausencia de estos GEI haría que el planeta tuviera una temperatura promedio de -18 °C (CMM, 2014).

Del total de la energía que recibimos del Sol, una tercera parte se refleja hacia la atmósfera por las superficies blancas como la nieve y las nubes, y las otras dos partes son absorbidas por la superficie terrestre y los océanos. Una vez que la energía solar ha calentado la superficie, ésta la vuelve a emitir en forma de radiación infrarroja hacia el espacio. En este último proceso, los GEI atrapan parte de la radiación infrarroja antes de que escape y devuelven el calor hacia la superficie. Debido al equilibrio térmico, el planeta pierde la misma cantidad de energía que absorbe, pero gracias al efecto invernadero se mantiene a una temperatura promedio con la cual los procesos vitales son posibles (CMM, 2014).

El sistema climático de nuestro planeta es extremadamente complejo y muchos procesos como el cambio de órbita, fluctuaciones en la energía recibida del Sol, erupciones volcánicas, etcétera, contribuyen a las modificaciones en los patrones climáticos (Rohli y Vega, 2018). Sin embargo, los cambios observados en las últimas décadas exceden en gran medida la variabilidad climática natural y hay bastante evidencia científica que demuestra que este calentamiento es resultado del incremento en las concentraciones de GEI de origen humano o antropogénico (Houghton *et al.*, 1990; Vitousek, 1994; IPCC, 2013). Estos gases están atrapando

¹ Artículo 1 de la Convención Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas, 1992.

una porción creciente de radiación infrarroja terrestre que impide que el calor escape, provocando el aumento de la temperatura planetaria. Además, la emisión de estos gases produce un efecto de largo plazo, pues algunos pueden durar en la atmósfera hasta 50 000 años (PNUMA, 2007).

Los GEI como el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O) existen de manera natural en la troposfera; sin embargo, su incremento a partir de la Revolución Industrial, debido a actividades humanas como la quema de combustibles fósiles y la tala inmoderada de árboles, ha ido modificando las propiedades de la atmósfera y consecuentemente el clima del planeta (véase tabla 1). El clima se define como una descripción estadística en términos de los valores medios y de la variabilidad de las magnitudes correspondientes de las temperaturas, considerando periodos de 30 años, según la Organización Meteorológica Mundial (IPCC, 2007). Una anomalía del clima se entiende tomando en cuenta que el promedio anual de temperaturas siempre ha variado, oscilando entre periodos fríos y cálidos. Sin embargo, en cada una de las últimas décadas se ha producido un aumento progresivo de la temperatura de la superficie de la Tierra, mayor que en cualquier década precedente desde 1850, lo que denota una anomalía respecto a los registros (IPCC, 2013).

Tabla 1. Cambio en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) durante el periodo 1750-2016

| Año | Dióxido de carbono (ppm) | Metano (ppb) | Clorofluorocarbonos (ppt) | Óxido nitroso (ppb) |
|------|--------------------------|--------------|---------------------------|---------------------|
| 1750 | 280 | 722 | 0 | 270 |
| 2016 | 403 | 1853 | 516 | 329 |

Fuente: OMM, 2017. ppm = partes por millón, ppb = partes por billón, ppt = partes por trillón

Es preocupante observar que el proceso de incremento de emisiones de GEI por efecto de las actividades humanas registró el mayor aumento durante la década pasada, entre 2000 y 2010, a pesar de que diversos países ya han adoptado medidas encaminadas a controlar el problema. Las evidencias de que muchos sistemas de nuestro planeta

están siendo afectados por el calentamiento global son contundentes. En los sistemas vinculados con temperaturas bajas se ha observado que el hielo del Ártico se está adelgazando, el número y la extensión de los lagos glaciales se ha extendido, la inestabilidad del terreno en las regiones de permafrost se está incrementando, las avalanchas de rocas en regiones montañosas han aumentado, la cubierta de nieve está disminuyendo, las estaciones gélidas en lagos y ríos se están acortando, la escorrentía está aumentando y las fechas de caudal máximo primaveral en numerosos ríos alimentados por glaciares y por nieve se están adelantando (Cannone *et al.*, 2008; Jian-Ping *et al.*, 2015). En los ecosistemas naturales se tiene evidencia de que los patrones de comportamiento fenológico de muchas especies vegetales y animales se han ido modificando. Los procesos primaverales como el retoñar de las plantas, la migración de las aves o la puesta de huevos se están presentando antes o sufren alteraciones en el ámbito geográfico (Dore, 2005; Pearce-Higgins *et al.*, 2017).

Diversas comunidades humanas también se están viendo afectadas por los cambios en los vectores de enfermedades infecciosas y el aumento de la producción de pólenes alérgicos (Hein *et al.*, 2009; Dai, 2010; Van der Velde *et al.*, 2012; Smith y Katz, 2013; Enríquez-de-Salamanca *et al.*, 2017). En los sistemas hidrológicos se observa que la temperatura de lagos y ríos en numerosas regiones aumenta, lo cual produce efectos sobre la estructura térmica (niveles de temperatura por capas), la composición química, la calidad del agua y la biodiversidad que en ellos habita (Williams *et al.*, 2018). Las tendencias de precipitación están aumentando en las latitudes norte y disminuyendo hacia los trópicos. Durante las últimas décadas se ha registrado un aumento en la frecuencia e intensidad de sequías, lo que ha impulsado grandes movimientos migratorios de personas y ha propiciado hambruna, crisis económica, social y política en muchos países de nuestro planeta (Reuveny, 2007; Sweet *et al.*, 2018). Por otro lado, las inundaciones de los últimos años han causado grandes pérdidas y daños a millones de casas en Bangladesh, China, India, Vietnam, México y Estados Unidos (CRED, 2018).

De acuerdo con los modelos climáticos globales (GCMS), esta situación se verá exacerbada para finales del siglo XXI, cuando se espera un aumento probable de la temperatura global de 1.5 a 4.5 °C (IPCC, 2013).

El quinto informe del panel intergubernamental de cambio climático (IPCC) proyecta que el aumento de la temperatura debido al incremento de GEI producirá un gran impacto en los recursos hídricos: acortará el periodo de lluvias, reducirá la cubierta de nieve, elevará el nivel del mar y generará con mayor frecuencia eventos extremos como inundaciones y sequías (IPCC, 2013). Según el IPCC, si se mantiene la tendencia actual, los daños mundiales serían catastróficos dado que el nivel del mar podría subir de 15 a 95 cm para el año 2100. El incremento de un metro en el nivel del mar desplazaría a 70 millones de personas en Bangladesh, sumergiría 80% de las Islas Marshall, amenazaría las costas suratlánticas de Estados Unidos y la zona costera de Japón, entre otros efectos. El derretimiento del hielo en el Ártico afectaría a los pueblos nativos del norte de Canadá y sería uno de los peores escenarios de desastre para el hemisferio norte.

Existen dos vías de acción reconocidas a escala global para enfrentar el problema: la mitigación y la adaptación. La *mitigación* es el término que se refiere a atender las causas del problema; es decir, son acciones que deben llevarse a cabo para contener o reducir las emisiones de GEI. Por otro lado, el término *adaptación* hace referencia a manejar las consecuencias y los impactos del cambio climático para atenuar los efectos perjudiciales o explotar las oportunidades beneficiosas (ONU, 1992). La adaptación y la mitigación son estrategias de respuesta importantes. Sin estrategias de mitigación tempranas y eficientes el costo de la adaptación aumentará y la capacidad de los países e individuos para responder de manera eficiente a los efectos del cambio climático se verá limitada, ya que la magnitud de los fenómenos meteorológicos extremos, como huracanes, sequías e inundaciones, tenderá a exacerbarse.

El cambio climático en ciudades

Los expertos advierten sobre los múltiples efectos del cambio climático en las zonas urbanas, como mortalidad por el riesgo de olas de calor, precipitaciones extremas, inundaciones (tanto en ciudades costeras como en urbes continentales), contaminación del aire, sequías, enfermedades por la proliferación de vectores que han modificado su distribución,

aumento del nivel del mar y marejadas en zonas urbanas costeras (IPCC, 2014). En particular, se resalta la disminución de las fuentes de agua superficial y subterránea en regiones subtropicales secas, lo que incrementaría la competencia por el recurso entre los sectores usuarios e impondría restricciones en el consumo de agua. El aumento de la temperatura amplía los riesgos de incendios forestales, que pueden poner en peligro también a zonas periféricas urbanas. Además, se proyecta que la producción de alimentos, particularmente maíz, trigo y sorgo, se reducirá, con el consiguiente riesgo sobre la seguridad alimentaria.

Según Naciones Unidas (2016), de las 1 692 ciudades con al menos 300 000 habitantes, 944 (56%) presentaban riesgo alto de exposición a por lo menos uno de los seis tipos de desastre natural (ciclones, inundaciones, sequías, terremotos, derrumbes y erupciones volcánicas), y la mayoría de los riesgos están asociados a fenómenos meteorológicos. En particular se ha resaltado la vulnerabilidad de las ciudades a las inundaciones por el incremento en el número e intensidad de eventos extremos. De hecho, diversas publicaciones analizan el tema de las inundaciones urbanas con el objetivo de generar recomendaciones para reducir su incidencia (Jha *et al.*, 2012; SADS, 2015; Bolognesi, 2015). Se reconoce que existen determinantes estructurales de la vulnerabilidad a las inundaciones asociadas a la disponibilidad y la calidad de la infraestructura que poseen las urbes, además de otras causas inherentes a su capacidad de gestión. A esas condiciones se suman ahora los peligros hidrometeorológicos del cambio climático que aumentan ese riesgo.

Todos esos factores podrían provocar el desplazamiento de poblaciones humanas, que agravarían tensiones sociales y económicas regionales (Campbell *et al.*, 2016). Los riesgos se amplifican para las personas que no tienen acceso a infraestructura básica y que habitan en zonas con alta exposición. Desde la perspectiva de la pobreza se argumenta que el cambio climático puede reducir el crecimiento económico de las áreas afectadas, lo cual hace más difícil salir de situaciones de marginación socioeconómica, con efectos en la seguridad alimentaria y creando nuevas barreras para superar esa condición marginal (IPCC, 2014).

Desde la perspectiva del acceso al servicio de abasto de agua potable, los compromisos internacionales han resaltado la relación entre el servicio de agua potable y la pobreza. A través de la Resolución 64/292,

la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento el 28 de julio de 2010, que tenía como antecedente la resolución sobre el tema de 2002. Según Naciones Unidas, un abastecimiento adecuado de agua salubre es esencial para evitar la muerte por deshidratación, reducir el riesgo de enfermedades relacionadas con la carencia del recurso y satisfacer las necesidades de consumo, alimentación, higiene personal y doméstica (CDESC, 2002). En este sentido, el agua es un elemento indispensable para la vida humana, pues una persona que no puede cubrir sus necesidades ve coartada su libertad y su capacidad para vivir una vida digna.

El reconocimiento sobre la importancia de tener acceso al agua se ha reflejado en los compromisos de la agenda internacional. En los Objetivos de Desarrollo del Milenio 2000-2015, la meta fue reducir a la mitad el porcentaje de personas sin acceso sostenible al agua potable y a servicios básicos de saneamiento para 2015. La mayoría de los países cumplió su meta, sobre todo en el entorno urbano. Sin embargo, se observaron diferencias sustanciales entre las áreas rurales y urbanas, y entre sectores de diferentes ingresos. En particular, la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) estimó que 70% de las personas sin acceso al servicio de agua potable y 84% de las que carecen de servicios de saneamiento correspondían al 40% de la población de más bajos ingresos (Cepal, 2010). Debido a que el acceso a estos servicios aún es un asunto prioritario, ahora los Objetivos de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas vuelven a hacer referencia al tema con una visión más amplia, pues su objetivo 6 busca garantizar la disponibilidad de agua, con una serie de metas más amplias que incluyen la gestión sostenible del recurso y que se conecta con otros objetivos sobre cambio climático, ciudades sostenibles, así como de ecosistemas terrestres y submarinos (UN, 2017). Es así que más allá de garantizar el servicio a todos los sectores, ahora se suma el riesgo por el fenómeno de cambio climático.

Resiliencia al cambio climático

Para analizar el desafío que significa adaptarse al cambio climático en las ciudades, es necesario reconocer que el problema está estrechamente

ligado con la capacidad que tienen las zonas urbanas para enfrentar los cambios a corto y largo plazo. Por eso se utiliza el concepto *resiliencia*, que se define como la capacidad de un sistema social o ecológico para absorber una alteración sin perder su estructura básica, su modo de funcionamiento o su capacidad de autoorganización (IPCC, 2007). Un sistema urbano resiliente resiste o cambia para lograr mantener un nivel aceptable de funcionamiento y estructura. Una ciudad resiliente puede enfrentar *shocks* y reconstruirse, si tiene la capacidad de sostenerse a sí misma a través de sus sistemas al hacer frente a eventos que la amenazan, dañan o tratan de destruirla (WB, 2008).

Una diversidad de factores puede impactar negativamente la resiliencia de las ciudades, entre ellos el crecimiento desordenado, el incremento de la contaminación, instituciones débiles y/o inflexibles que no responden de manera adecuada a las necesidades de la sociedad, subsidios que incentiven prácticas no sustentables, etcétera. Debido a que cada vez se concentra más población en zonas urbanas, las publicaciones especializadas enfatizan la vulnerabilidad de ciudades en países en desarrollo por su frágil capacidad institucional (Stern, 2006).

El proceso de urbanización a escala mundial ha demostrado las limitaciones para abastecer los bienes y servicios necesarios para cubrir las necesidades de la población urbana. Para evaluar en qué medida las ciudades podrán responder al cambio climático debe considerarse que los impactos se relacionan directamente con el manejo de riesgos. Las ciudades enfrentan riesgos importantes relacionados con el manejo del recurso porque tienen altos niveles de vulnerabilidad en diferentes sectores, como el abasto de agua, el manejo de inundaciones, la contaminación de fuentes de agua o incluso la seguridad alimentaria (Cohen, 2006; Swilling y Anneck, 2012).

La vulnerabilidad, entendida como el “grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos”, está presente en la mayoría de las grandes ciudades de países en desarrollo e incluso en urbes de naciones desarrolladas (IPCC, 2007; UN-Habitat, 2011). Desde el punto de vista individual, la vulnerabilidad es el grado en el que las personas son afectadas por factores que perturban sus vidas y que están fuera de su control inmediato. La vulnerabilidad es

una combinación de factores dinámicos que aumentan la susceptibilidad de la ciudad o de un individuo al impacto de un peligro.

El impacto de un evento catastrófico está asociado con la magnitud de este último, con la cantidad de personas y actividades económicas que se ven afectadas, con la presencia de factores sociales que aumentan la vulnerabilidad, como la marginalidad o la exclusión social, y con factores de orden logístico o de capacidad de respuesta de las autoridades (Constantino y Dávila, 2011). De hecho, para analizar los riesgos debe considerarse el concepto de *exposición*, que hace referencia al sistema afectado, incluyendo la presencia de personas, viviendas, servicios ambientales, disponibilidad de infraestructura y bienes económicos, sociales y culturales que posee un lugar y que pueden verse impactados por un evento extremo (IPCC, 2007).

La vulnerabilidad dependerá entonces del carácter, la magnitud y la rapidez del cambio climático al que estén expuestos una ciudad o un individuo, y de su capacidad de adaptación (IPCC, 2007). Cuando se encuentran ciudades que tienen una calidad de funcionamiento precaria, la capacidad para resistir impactos, o eventualmente retornar a las condiciones de estabilidad, es baja (Constantino y Dávila, 2011). Por ejemplo, una reducción del volumen de agua en cuencas demasiado explotadas, debido a cambios en los patrones de precipitación y evapotranspiración, puede traducirse en un problema grave si existe un sistema de abasto de agua que no está preparado y si un gran número de personas que sufre falta del servicio vive en condiciones de pobreza.

El nivel de riesgo derivado de los impactos del cambio climático se relaciona no sólo con la probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas de las modificaciones del clima, sino con el resultado de la interacción de este peligro con las condiciones de vulnerabilidad de la propia ciudad (WB, 2008). Podemos decir que los peligros ocasionados por el cambio climático deben sumarse a los que actualmente enfrentan las ciudades por políticas no sustentables.

Un tema importante para lograr políticas de adaptación guiadas por el paradigma de la sustentabilidad es el aprovechamiento efectivo de los bienes y servicios ambientales. Los sistemas naturales pueden utilizarse para reducir los impactos directos de huracanes, para facilitar los sistemas de drenaje en caso de lluvias extremas, reducir los efectos

de olas de calor, proveer alimentos y agua, entre otros (McPhearson *et al.*, 2015). En particular, en las zonas urbanas y periurbanas pueden aprovecharse los sistemas naturales que aumentan la disponibilidad de servicios ambientales y que podrían mejorar la resiliencia de las comunidades. Por ejemplo, existen recomendaciones sobre cómo el reverdecimiento de las ciudades puede reducir el riesgo de inundaciones (Jha *et al.*, 2012). Sin embargo, el aprovechamiento de los ecosistemas naturales requiere desarrollar sistemas planeados que utilicen de forma efectiva los activos ambientales para reducir los riesgos potenciales del cambio climático.

Medidas de adaptación en la gestión del agua

Para reducir los riesgos del cambio climático es necesario implementar políticas de adaptación. El objetivo de la adaptación es disminuir la vulnerabilidad frente a los impactos negativos del cambio climático y la variabilidad climática. La adaptación también supone mejorar la capacidad de capturar cualquier beneficio del cambio climático; por ejemplo, cuando las ciudades puedan tener acceso a mayor cantidad de agua por el aumento en la precipitación se podrían hacer los ajustes necesarios en su infraestructura para aprovechar ese potencial (Stern, 2006; IPCC, 2014). Los programas de adaptación tienen además otras ventajas, como aumentar la resiliencia de las sociedades ante otros desastres, debido a que las preparan para eventos potencialmente peligrosos.

Algunos países han empezado a hacer evaluaciones del cambio climático y del sector hídrico en su relación con las ciudades. El impacto del cambio climático en la gestión del agua se ha evaluado en términos del abasto del servicio y del manejo de las inundaciones, particularmente en los Países Bajos, Australia, Reino Unido, Alemania, Estados Unidos, Bangladesh y Argentina (IPCC, 2007; SMADS, 2015). De manera general, el tema del agua ha sido abordado por el Programa de Naciones Unidas para Asentamientos Humanos (UN-Habitat, 2011), tanto en su dimensión de mitigación como de adaptación. Existen experiencias documentadas para organismos operadores de agua en Estados Unidos (Miller y Yates 2005; US-EPA, 2011), así como análisis para ciudades

asiáticas (WB, 2008). El IPCC publicó un informe técnico sobre el tema del agua con una serie de recomendaciones para integrarlas a la toma de decisiones en el sector (Bates *et al.*, 2008).

Se ha enumerado una larga lista de políticas de adaptación, las cuales consideran aspectos como la infraestructura —la construcción de estructuras para proteger determinadas zonas costeras y núcleos poblacionales—, los ordenamientos territoriales para organizar el uso del territorio a partir de información técnica y con la participación de las comunidades, la identificación de zonas y comunidades más vulnerables, las estrategias de desarrollo comunitario, las mejoras en los sistemas de manejo de agua y el desarrollo de programas nacionales de acciones sobre adaptación (NAPA) (WB, 2008; Bates *et al.*, 2008; EPA, 2011).

En materia de gestión del agua, algunas ciudades han contemplado medidas de adaptación frente al cambio climático, como ampliar la recolección de agua de lluvia, planes de conservación o ahorro de agua, reutilización de agua, así como desalinización, y eficientar el uso del agua en general y para riego en particular. Se sabe que Londres, Venecia y Yakarta han optado por un nuevo drenaje para agua pluvial, mientras que en Tokio se diseñaron estanques bajo carreteras y parques para mantener temporalmente las corrientes de agua y evitar inundaciones.

En la tabla 2 se mencionan algunas opciones de adaptación, el marco institucional en que deberían desarrollarse y las limitaciones que pueden enfrentarse. Por ejemplo, para prepararse frente a escenarios de escasez del recurso se recomienda ampliar la recolección de agua de lluvia, desarrollar sistemas de almacenamiento o mejorar las técnicas de riego. Ante el aumento de lluvias extremas, se recomienda evaluar la pertinencia de construir barreras contra inundaciones o la conservación de humedales naturales para controlar los flujos de agua. Dentro de los planes de adaptación también se contemplan mejoras de los sistemas de alertas tempranas frente a riesgos hidrometeorológicos y sistemas de protección civil (Stern, 2006; World Bank, 2008; IPCC, 2014). En países en desarrollo también se recomienda limitar el crecimiento de las grandes manchas urbanas debido a restricciones en el abasto de agua, por medio de la prohibición de permisos para nuevas construcciones (WB, 2008; Stern, 2006; ONU, 2011).

Tabla 2. Oportunidades de adaptación en zonas urbanas

| Sector | Opción de adaptación/ estrategia | Marco político subyacente | (-) Limitaciones y (+) oportunidades para implementación |
|---|--|--|--|
| Agua (por ejemplo: King Country, Seattle, Singapur) | Ampliación de la recolección de agua de lluvia; almacenamiento de agua y técnicas de conservación; agua tratada; desalinización; uso del agua y eficiencia en riego. | Políticas nacionales de agua y gestión integrada de los recursos hídricos; riesgos relacionados con la gestión del agua. | (-) Finanzas de los recursos humanos y barreras físicas. (+) Recursos de manejo de agua integrados; gestión integrada de recursos hídricos; sinergias con otros sectores. |
| Infraestructura y asentamientos (incluye zona de costa) (por ejemplo: Venecia, Londres, Nueva York) | Reubicación de malecones y mares mediante el aumento de barreras; refuerzos de dunas; adquisición de tierras y creación de humedales; barreras contra inundaciones; protección de barreras naturales existentes. | Estándares y regulaciones de integración y consideraciones del cambio climático; uso de la tierra; códigos de construcción; seguros. | (-) Barreras tecnológicas y financieras. (+) Disponibilidad de reubicación de espacios; políticas integrales y manejos de sinergias con metas de desarrollo sustentable. |

Fuente: IPCC, 2007.

Desde una perspectiva integral, estas medidas de adaptación deben estar incluidas en las políticas nacionales de agua y gestión de recursos hídricos, en las políticas de uso de suelo, en códigos de construcciones y en las estrategias de protección civil. Generalmente, para la implementación de medidas de adaptación se reconoce que existen barreras en términos de recursos financieros, humanos, tecnológicos y físicos. Sin embargo, también pueden existir oportunidades a partir de las sinergias que se establezcan con otros sectores que busquen políticas encaminadas al desarrollo sustentable. Por este motivo, la reducción de la pobreza, incluyendo la mejora de las viviendas y la infraestructura básica y de los servicios, es un elemento básico de la adaptación en las ciudades.

De hecho, se reconoce que en general la capacidad de adaptación de las sociedades está íntimamente relacionada con su desarrollo social y económico, aunque esta capacidad puede distribuirse de forma desigual dentro de la sociedad (WB, 2011). Por consiguiente, ciudades bien gobernadas que han desarrollado sistemas para prevenir los riesgos de fenómenos relacionados con el cambio climático están mejor preparadas para enfrentarlos, aunque no es una constante, pues depende de la magnitud del evento. Se han presentado casos de ciudades con sistemas de planeación relativamente bien organizados donde la magnitud del evento extremo rebasa su capacidad para enfrentar el impacto; por ejemplo, las inundaciones que se produjeron en Texas con el huracán *Harvey* muestran las limitaciones de la infraestructura existente para prevención de inundaciones (Zabcik, 2017).

Las vías de acción de mitigación y adaptación se complementan y se refuerzan en varios casos. Existen medidas de adaptación que pueden ayudar a mitigar las emisiones de GEI; por ejemplo, al reducir los niveles de consumo de agua para uso doméstico, industrial o agrícola se disminuye el gasto de energía por el transporte y el tratamiento del agua, al tiempo que aumenta la capacidad de la sociedad para enfrentar problemas de escasez del recurso en el futuro. Por este motivo, se recomienda que las medidas de adaptación establezcan sinergias con las estrategias de mitigación, particularmente en las interacciones entre temas de agua, energía, uso de suelo y biodiversidad (IPCC, 2014). Las medidas de adaptación pueden tener también sinergias con la reducción general de desastres, de forma que las inversiones en el tema se ven como medidas

de resultados garantizados (*no-regret*, por el término en inglés); es decir, aquellas que hacen sentido desde el punto de vista del desarrollo, aunque la amenaza climática específica no se llegara a presentar en el futuro en contextos territoriales determinados.

Entre las limitaciones típicas de las políticas de adaptación se encuentran la insuficiencia de recursos financieros y humanos, la mala coordinación e integración de los mecanismos de gobernanza, intereses que compiten, ausencia de líderes y promotores de la adaptación, así como escasas herramientas para monitorear la adaptación. El desarrollo de políticas de adaptación efectivas supone entonces tener acciones coordinadas en diferentes niveles, desde los individuos hasta el gobierno. Se resalta que los gobiernos locales y el sector privado son actores fundamentales para el manejo del riesgo y el financiamiento (Stern, 2006). Más aún, en el proceso de diseño de políticas de adaptación se recomienda tener un enfoque de toma de decisiones participativo con las comunidades afectadas, pues al integrar a los actores locales en la planeación e implementación de las acciones de adaptación se reconoce la importancia de los valores sociales, la percepción del riesgo y las características del lugar. Desde esta perspectiva, los sistemas de conocimiento y prácticas indígenas, locales y tradicionales, son fuentes importantes para la adaptación (IPCC, 2014).

Se advierte sobre el riesgo de subestimar la complejidad de la adaptación al cambio climático, pues puede crear expectativas irreales sobre los resultados de la adaptación (IPCC, 2014). La insuficiente investigación para anticipar las consecuencias específicas en contextos determinados, que puede aumentar la incertidumbre sobre los impactos del cambio climático, así como de diferentes percepciones sobre el riesgo, es también una limitante de la adaptación de políticas. De hecho, un problema con la adaptación es concentrarse en los cambios a corto plazo, sin visualizar los cambios a mediano y largo plazo que seguirán dándose por el aumento gradual de la temperatura.

Debido a la importancia de aumentar el financiamiento para el sector del agua, es recomendable manejar sus costos de abastecimiento de manera eficiente para facilitar políticas de adaptación. En ciudades de países en desarrollo los precios por la distribución del agua suelen determinarse de forma administrativa, e incluso existen situaciones en

las que domina el criterio estrictamente político (Whittington *et al.*, 2009). Prevalece un patrón donde la tendencia es mantener precios bajos para asegurar el acceso a todos los habitantes, ya que existe una proporción mayoritaria de la población que vive en condiciones de pobreza. Pero es bien sabido que las tarifas bajas por el consumo de agua fomentan su sobreuso y desperdicio. Cuando se presentan tarifas bajas, las actitudes de conservación del individuo sólo tendrán lugar como resultado de consideraciones morales o de regulaciones directas. En cambio, por el lado de los organismos operadores, los precios por debajo del costo real o marginal provocan un aumento en la demanda de agua, que lleva a satisfacerla mediante la explotación de nuevas fuentes más costosas, pero que no corresponden al valor que le otorgan los consumidores (Gibbons, 1986). El resultado es un consumo excesivo, que no justifica el alto costo de abastecimiento, y que la sociedad subsidie a quienes reciben agua barata (Soto, 2007).

Existe consenso entre los especialistas en el sentido de que los subsidios generalizados o mal diseñados han resultado erróneos, porque es evidente que los hogares con mayores ingresos, que cuentan con mejores servicios públicos, disfrutan principalmente de los beneficios (Komives *et al.*, 2005; Whittington *et al.*, 2009; Soto, 2007). En términos de finanzas públicas, los subsidios reducen la capacidad de las autoridades para expandir y mejorar el servicio de los hogares de bajos ingresos (LeBlac, 2007). Es indispensable que los organismos operadores de agua pasen de la etapa de sólo ampliar la infraestructura a otra donde reduzcan los problemas de confiabilidad del servicio, mejoren la administración del propio organismo, incluyendo su capacidad de recaudación, y aumenten sus niveles de inversión en acciones para mitigar el impacto del cambio climático sobre el manejo del recurso.

Tipos de adaptación y políticas públicas ante el cambio climático

Cuando se elaboran análisis sobre los impactos del cambio climático existe un alto nivel de incertidumbre derivado de diversos factores que incluyen la resolución de los modelos, las limitaciones de conceptualización de los modelos climáticos, los procesos de escalamiento, las

imperfecciones en los modelos hidrológicos o la limitación de información con que cuentan los países, sobre todo aquellos en desarrollo (Miller y Yates, 2005).

En la gestión de los recursos hidráulicos se reconoce que los tomadores de decisiones en los organismos operadores de agua están habituados a la incertidumbre derivada de las diferencias en los resultados de modelos hidrológicos en términos de caudal, de recarga subterránea, de calidad del agua, etcétera (Boorman y Sefton, 1997). Sin embargo, se advierte que estas diferencias son pequeñas en comparación con la incertidumbre atribuida al cambio climático reflejada en los resultados de los modelos de circulación global (MCG), donde se representan los procesos climáticos para vincular procesos físicos, químicos y biológicos de la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre, en sus interacciones y funciones de retroalimentación. Por ejemplo, bajo diferentes escenarios de cambio climático algunos MCG proyectan incrementos mientras otros simulan reducciones en las precipitaciones para la misma ciudad en el mismo periodo. Miller y Yates (2005) comentan que, dada la naturaleza de esta incertidumbre, podría ser tentador ignorar el cambio climático en el análisis de decisiones.

El cambio climático es un desafío conceptual para los gestores hídricos, pues significa que podría ser necesario tomar decisiones de adaptación antes de conocer con claridad cómo están evolucionando realmente los sistemas hidrológicos. Aunque los escenarios plantean probables situaciones futuras, cuando se presentan grandes diferencias entre posibles impactos, la recomendación es llevar a cabo acciones de política paulatinas, que se vayan ajustando a los avances en el conocimiento y a las condiciones reales. Ignorar las eventuales repercusiones del cambio climático generaría consecuencias graves, por lo que se recomienda utilizar un enfoque de gestión integrada del agua, lo cual supone considerar los posibles efectos con un rango de acciones de oferta y demanda que incorpore a las partes interesadas en el proceso de toma de decisiones, de manera que pueda obtenerse una perspectiva equilibrada de las estrategias a seguir.

El IPCC (2007) ha recomendado diferenciar la adaptación autónoma de la adaptación planificada. La adaptación autónoma es aquella que no constituye una respuesta consciente a los estímulos del clima,

sino que se deriva de cambios introducidos para satisfacer nuevas demandas, objetivos y expectativas que, aunque no hayan sido ideados expresamente para compensar el cambio climático, pueden reducir las repercusiones de ese cambio. Por otro lado, la adaptación planificada es el resultado de decisiones políticas deliberadas y toma en cuenta específicamente el cambio y la variabilidad del clima, aunque rara vez es implementada.

Las sociedades que ejecutan acciones de adaptación planificadas pueden reducir de forma considerable los costos sociales, económicos, ambientales y políticos del cambio climático. La adaptación planificada se enfoca en bajar los costos haciendo frente a los problemas de manera preventiva, conocidos como acciones *ex ante*, mientras que la adaptación autónoma enfrenta los impactos adversos una vez que el evento se presentó; es decir, son acciones *ex post*.

Lecocq y Shalizi (2007) explican que la adaptación autónoma es reactiva y debe considerar entre sus costos la combinación de gastos de supervivencia —aquellos que se hacen en el momento inmediato que sucede el evento— y gastos de reconstrucción —los que se hacen cuando pasó la contingencia—. Es decir, la adaptación autónoma utiliza recursos para hacer frente a eventos en el momento en que ocurren —costos de mitigación y adaptación reactiva— y también recursos para tratar de reparar los daños. Se debe considerar que este tipo de adaptación no es suficiente para restablecer por completo el sistema, o mantener el *statu quo* previo al evento, por los aspectos irre recuperables; por ejemplo, pérdidas que son imposibles de restablecer (como pérdida de vidas humanas, alteración de paisajes, pérdida de biodiversidad o desaparición de bienes culturales) o económicamente muy costoso de reparar. Estas pérdidas pueden ser referidas como daños residuales y deben considerarse como parte de los costos del evento. De esta manera, el costo total de la adaptación autónoma consistirá de cuatro componentes: costos de mitigación, de adaptación proactiva, de adaptación reactiva y daños residuales (Lecocq y Shalizi, 2007).²

² El Plan de Acción Nacional de Olas de Calor de Francia fue aplicado como una reacción a la ola de calor de 2003 (adaptación reactiva *ex post*), pero ha sido ejecutado de forma anticipada para eventos próximos (adaptación proactiva *ex ante*). El plan menciona explícitamente al cambio climático como el motivo (Lecocq y Shalizi, 2007).

La adaptación planificada, por otro lado, se basa en la prevención y utiliza recursos para anticipar posibles crisis en el futuro. Aquí se vuelve relevante la generación de recursos para financiar las acciones que reduzcan la vulnerabilidad de los sistemas de abasto y drenaje de las ciudades. En este caso los costos de adaptación proactiva serán mayores, porque llevarán a priorizar la construcción de infraestructura o mejorar los sistemas de gestión; no obstante, se reducirán considerablemente los costos de mitigación y de adaptación reactiva y los daños residuales. El problema es que, en la práctica, cambios en el comportamiento y en las decisiones de política son con frecuencia más fáciles de ejecutar una vez que la crisis ha ocurrido que cuando se anticipa una situación crítica. Sin embargo, desde el punto de vista económico, los costos preventivos suelen ser menores en comparación con los de acciones reactivas (Lecocq y Shalizi, 2007).

Este tema es fundamental para los programas de agua en países en desarrollo, donde en general las inversiones han sido limitadas porque éste no es un asunto políticamente rentable y los recursos se destinan a proyectos de inversión más visibles (Whittington *et al.*, 2009). La inversión insuficiente en el sector provoca que los problemas de disponibilidad y contaminación del recurso se vuelvan cada vez más graves, sobre todo para los sectores que viven en condiciones de marginación, pero también porque pone en riesgo la provisión del servicio a la población frente a posibles problemas de acceso al servicio en el futuro. Por lo anterior, es importante identificar las vulnerabilidades que enfrentan los sistemas de distribución y drenaje de agua para poder crear estrategias y políticas que ayuden a afrontar los riesgos futuros derivados del cambio climático.

Para garantizar la seguridad del agua frente a los diversos escenarios de cambio climático es necesario reconocer que la gestión del riesgo es un elemento fundamental que debe formar parte de las agendas de política pública a largo plazo. Estas políticas deben considerar una amplia gama de escenarios futuros y ser flexibles para adaptarse a diversas condiciones climáticas que surjan y responder a los desafíos locales, regionales, nacionales y transfronterizos (Forsyth, 2013). Incluso se ha reflexionado sobre la importancia de definir políticas de adaptación a escala transfronteriza, porque pueden reducir conflictos si se prevé el

manejo de los recursos hídricos bajo diferentes escenarios de cambio climático (Vij *et al.*, 2017).

La creciente crisis del agua en todo el mundo se considera cada vez más como un problema de gobernanza, que como uno de escasez (Perreault, 2014; Dinar *et al.*, 2015). Para diseñar e implementar políticas climáticas efectivas es necesario comprender el contexto pasado y presente de las que cada país ha instrumentado al respecto. Es decir, hay que entender cómo los actores perciben el problema, cómo integran los diferentes escenarios de cambio climático en el sistema de gobierno, cómo los distintos niveles de gobierno establecen sus metas y cuántos recursos financieros asignan para implementar las políticas (Vij *et al.*, 2018). Henstra (2016) señala que el tipo de política de adaptación climática que cada país adopta depende del conocimiento, el tipo de autoridad y la organización que lo constituyen. Por otro lado, Howlett (2009) indica que el rango de los instrumentos financieros, como fondos, subsidios, impuestos, beneficios fiscales, subvenciones, crédito sin intereses y exenciones de crédito, demarcan claramente el alcance de los objetivos de la política climática y la condición abstracta o específica como se desarrolla.

Tanto los planes de desarrollo como los de resiliencia climática revelan la necesidad de pensar en la integración de políticas. Las estrategias de adaptación en los diversos escenarios de cambio climático requieren vincular la gestión de conflictos con una gobernanza del agua más amplia que promueva la mejora del bienestar social. De igual manera, demandan acciones que disminuyan las tensiones existentes y transformen los conflictos en compromisos cooperativos (Scheffran *et al.*, 2014). La adaptación climática, el manejo del agua y del conflicto abarcan diversos sectores políticos que a menudo se consideran por separado; no obstante, su manejo integral promueve el desarrollo social, sobre todo a escala local (Gustafsson, 2016). Las políticas de adaptación climática deben considerar el manejo integral de agua para tener éxito, el contexto en el que vive la gente, cómo funcionan las instituciones y entender las interacciones entre los diversos sectores. De hecho, el proceso debe ser sensible al conflicto y gestionar la negociación, la participación y el compromiso en múltiples niveles de acciones en todas las escalas (Vivekananda *et al.*, 2014).

Es importante saber que las estrategias de adaptación ahora se pueden dar en una multiplicidad de ámbitos, en los que otros actores diferentes al gobierno también pueden tener impactos positivos en zonas específicas. Por ejemplo, en Estados Unidos la iniciativa Vibrant Cities Lab, un plan del servicio forestal, y la Asociación Nacional de Consejos Regionales que promueve proyectos de infraestructura verde, donde una de sus líneas es la prevención de inundaciones severas (<https://www.vibrantcitieslab.com/>).

2. Vulnerabilidad hídrica de México frente al cambio climático

Este capítulo reflexiona sobre la importancia de considerar los posibles efectos del cambio climático en la gestión del agua en México. Analizando sus actuales patrones de uso, contaminación y distribución se explica por qué el país es particularmente vulnerable en el manejo del agua. Además, se examinan las características generales de los sistemas de abasto de las ciudades y la afectación que sufren amplios sectores de la población por tandeos y/o mala calidad del líquido.

Efectos del cambio climático en México

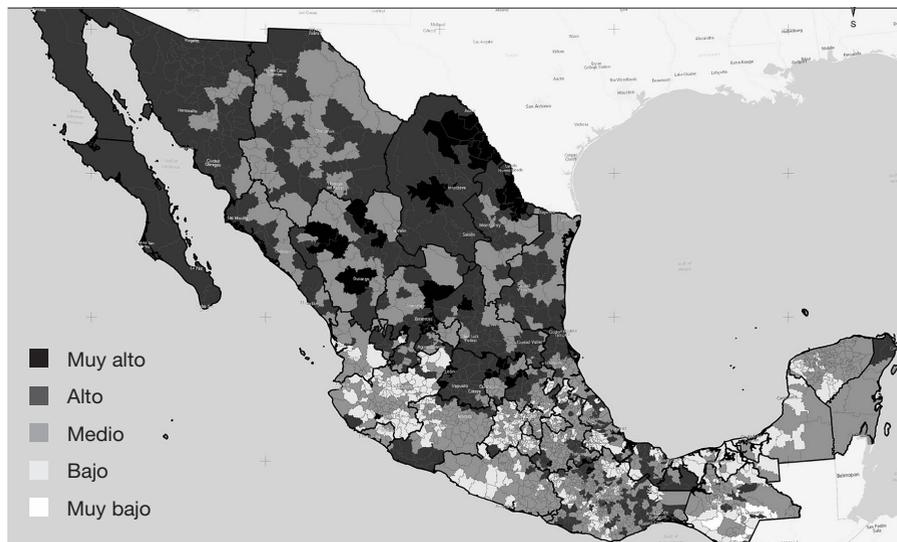
En México, los efectos del cambio climático se han manifestado en una secuencia de desastres de origen hidrometeorológico con graves daños para la sociedad. Por un lado, se han presentado sequías en 1997, 1998, 2005, 2009, 2011 y 2012, que provocaron incendios forestales, pérdida de cosechas y muerte de ganado, además de escasez de agua principalmente en el norte y centro del país. El evento de sequía 2011-2012 ha sido uno de los más severos desde 1941, ya que afectó a cerca de 70% del territorio nacional y tuvo un costo económico de cerca de 6.5 millones de dólares (Korenfeld, 2014). Por otro lado, las lluvias extremas se han intensificado desde 1999 y han provocado inundaciones severas y grandes pérdidas humanas y económicas en toda la República, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Eventos por inundaciones en México

| Evento | Costo (millones de pesos) |
|--|------------------------------|
| Huracán <i>Wilma</i> , 2005 | 1 723 |
| Inundaciones de Tabasco y Chiapas, 2007 | 2 918 |
| Huracán <i>Dean</i> , 2007 | 877 |
| <i>Ingrid</i> y <i>Manuel</i> , afectaciones en Chiapas, Guerrero y Oaxaca, 2013 | 3 041 |
| Huracán <i>Earl</i> , 2013 | 13 793 |
| Huracán <i>Katia</i> , afectaciones en Tamaulipas y Veracruz, 2017 | 380 |

Fuente: Cenapred, 2017.

Figura 1. Grado de peligro por sequía a escala municipal



Fuente: Elaboración propia con datos del Cenapred, 2012.

El aumento de la población durante el siglo xx y la falta de una planeación urbana efectiva han originado asentamientos humanos en zonas de alto riesgo como cauces de ríos, barrancas, cañadas y sitios expuestos a huracanes, poniendo cientos de vidas en peligro. Comparado con otros países, se reconoce que México se encuentra entre los más vulnerables al cambio climático, ya que 15% de su territorio, 68% de su población y 71% del PIB están altamente expuestos a contingencias, aunado a un probable aumento de 20 cm del nivel del mar para 2050 (DOF, 2012). Las propias autoridades han afirmado que el cambio climático representa un riesgo para la seguridad nacional porque amenaza con impedir el desarrollo económico y social del país. Se prevé que, de no actuar ahora, para 2050 se podrían reducir 25% las áreas cultivables, la mitad de los ecosistemas de bosques tendrían vegetación de climas más secos, con el consecuente impacto en la biodiversidad, mientras que las sequías podrían afectar a 80% de la población en el norte y centro de la República, donde se concentra la mayor actividad económica (Peralta, 2008). En general, las proyecciones de los escenarios globales indican que para finales del siglo xxi podría haber un aumento en la temperatura de cerca de 4 °C en el norte y de 2.5 ° a 3.5 °C en el resto del territorio. Las proyecciones también indican reducciones en las precipitaciones de 5 a 10 por ciento.

Los costos económicos asociados a eventos hidrometeorológicos ascendieron a 21 950 millones de dólares durante el periodo 2000-2012, sin contar la pérdida de vidas humanas y de capital natural (DOF, 2014). Dado que la tendencia para los años subsiguientes va en aumento, es indispensable tomar en cuenta la dimensión de los desastres ambientales, así como la necesidad de proteger las concentraciones urbanas y los ecosistemas, con los servicios y las funciones de regulación de seguridad ambiental.

Para México los riesgos por sequías son un tema prioritario porque la mayor parte de su territorio está compuesto por climas secos y muy secos. Las zonas que históricamente han sido afectadas por las sequías se han clasificado en diferentes escalas y se ha identificado que cerca de 40% de los habitantes del país se encuentra localizado en zonas con un alto a muy alto riesgo de sequías (Cenapred, 2014). En la figura 1 se muestra información sobre el grado de peligro de sequías a escala municipal; según esos datos, 724 municipios están clasificados con un grado de peligro alto y muy alto por sequía, pero sube a 1 854 municipios si se considera un peligro medio.

Los escenarios de cambio climático indican que precisamente las mayores presiones por la reducción en las precipitaciones se presentarían en la zona norte del país para el año 2050 y se acentuarían en 2100. En estas regiones se proyecta una menor disponibilidad de agua derivada de una mayor evaporación, menor humedad del suelo y disminución de escurrimientos e infiltraciones. Además, el aumento de la población urbana y de la actividad económica llevará a un incremento en la extracción de agua, esencialmente de los acuíferos. De hecho, se han estimado los impactos económicos del cambio climático hacia 2050, previendo que podrían representar cerca de 4% del PIB, y 60% del costo pronosticado se relacionaría con los recursos hídricos (Galindo, 2009).

En contraste, las zonas costeras y el sureste del país se ven amenazados por fuertes lluvias y huracanes con gran poder de destrucción. El 15% de la población de México habita en 150 municipios costeros y gran parte vive en condiciones de marginación. En algunas zonas se prevé el riesgo de aumento del nivel del mar de aproximadamente 40 cm antes de 2100. Por otro lado, los estudios sobre eventos hidrometeorológicos extremos indican que la frecuencia de los huracanes de alta intensidad se está incrementando. Los estudios para el periodo 1970-2009 muestran que los huracanes categoría 3, 4 y 5 hoy en día son más frecuentes en el Golfo de México y en el Caribe. En este periodo, el Atlántico mexicano fue afectado por 264 ciclones tropicales, y por 549 en el Pacífico (CICC, 2012). De manera paralela, gran parte del país se halla amenazada por su vulnerabilidad a las inundaciones; 1 891 municipios están clasificados con una vulnerabilidad media y alta a esa posibilidad, y de ellos 261 son altamente vulnerables. Tan sólo en Querétaro, 1 874 viviendas fueron afectadas por una severa inundación en 2016 y los costos de reconstrucción ascendieron a ocho millones de pesos (véase figura 2).

Vulnerabilidad asociada a la gestión del agua en México

La disponibilidad del agua renovable per cápita en México se ha reducido considerablemente en las últimas décadas; en 1950 era de 17 742 m³, pero para 2015 cayó a 3 656 m³ (Conagua, 2018). El uso del recurso ha alcanzado o sobrepasado los límites de la disponibilidad natural en

diversas regiones del país, sobre todo alrededor de las grandes zonas urbanas del centro y el norte. La Comisión Nacional del Agua (Conagua) maneja un indicador de grado de presión sobre el recurso hídrico, que muestra un nivel fuerte (explotación de 40 a 100% del recurso renovable) en la región norte y noroeste del país y un nivel de presión muy fuerte en el valle de México, donde la explotación se estima en 141.4% del recurso renovable (Conagua, 2018).

En la actualidad, diversas cuencas se encuentran sobreexplotadas, presentan problemas de contaminación, y la competencia de los sectores por el agua se intensifica. Este impacto sobre el medio ambiente, generalmente llamado *externalidades*, no ha sido cuantificado, pero afecta a varios sectores de la población, así como a los ecosistemas locales y regionales. Dicha tendencia se ha visto acompañada por la degradación de la calidad del agua superficial y subterránea debida a las descargas de ciudades, industrias y actividades agrícolas. En particular, la calidad del agua subterránea se ha deteriorado como consecuencia del manejo inadecuado de los residuos y de las fugas del drenaje.

Figura 2. Inundaciones en la ciudad de Querétaro durante septiembre de 2017



El bajo nivel de tratamiento de aguas residuales es un problema grave que reduce las fuentes del recurso y que genera innumerables costos de salud y productividad. En el país sólo 58.2% de las aguas residuales recibe tratamiento (Conagua, 2017), lo cual explica por qué la mayoría de los ríos que están dentro o alrededor de muchas ciudades se hallan contaminados. La contaminación y las deficiencias en los sistemas de desagüe provocan que cuando se presentan eventos de lluvias extremas en zonas urbanas se produzcan desbordamientos de aguas negras en áreas extensas, lo que genera no sólo pérdidas materiales sino además riesgos en la salud de la población afectada. Esta situación es característica de las ciudades más grandes del país, como la zona metropolitana del valle de México o la zona metropolitana de Puebla, donde los ríos, en su mayoría, son drenajes a cielo abierto. Además, en diversas regiones, el agua residual sin tratar se utiliza con fines de riego agrícola, con la consecuente reducción de la calidad de muchos cultivos, los efectos en la salud de los agricultores y los consumidores, así como los impactos negativos sobre el suelo, el agua subterránea y el medio ambiente de las regiones afectadas (Aquino *et al.*, 2013; Domínguez *et al.*, 2004).

El hecho de que 105 acuíferos enfrenten problemas de sobreexplotación (Conagua, 2018) pone en riesgo la provisión del servicio y hace a la población vulnerable frente a posibles contingencias futuras derivadas del cambio climático. Por ejemplo, una reducción del volumen de agua en cuencas demasiado explotadas, debido a cambios en los patrones de precipitación y evapotranspiración, puede traducirse en una crisis. Por otro lado, los eventos meteorológicos extremos incrementan el riesgo de deslaves por las corrientes de agua, sobre todo en zonas con pendientes pronunciadas y que tienen asentamientos irregulares.

Es previsible que conforme avancen los efectos del cambio climático disminuya la disponibilidad media de agua por habitante en extensas regiones del país, donde se concentra la mayor cantidad de habitantes y actividad económica. El grado de vulnerabilidad frente al cambio climático aumentará en la medida en que persistan prácticas de riego agrícola poco eficientes e ineficiencia en los sistemas de distribución de abasto de agua potable en zonas urbanas y se continúe con un escaso tratamiento de aguas municipales e industriales que reduce la disponibilidad de agua superficial y contamina los acuíferos.

Gestión del agua en las ciudades

El continuo crecimiento de la población ha aumentado la demanda de agua y ha hecho vulnerables a comunidades y ciudades cuyo suministro del vital líquido es limitado. Las necesidades de abasto para la población urbana crecieron de forma exponencial durante el siglo xx y se cubrieron a partir de la construcción de nueva infraestructura que requirió enormes montos de inversión e hizo uso intensivo de aguas superficiales y subterráneas. En México, al igual que en otros países, el proceso de crecimiento demográfico, acompañado de una tendencia de urbanización, hizo que la población en las ciudades pasara de 11 886 000 personas en 1950 a cerca de 88 272 000 en 2010, lo que significa que en sólo 60 años la densidad poblacional urbana creció más de siete veces (UN, 2011). El fenómeno de la rápida urbanización ha llevado a las autoridades a invertir cuantiosos recursos financieros para aumentar la red de agua potable, seguida por los sistemas de drenaje.

La cobertura del servicio de agua potable en las localidades urbanas de México es alta, pues según datos del Censo de Población y Vivienda de 2010, el 97.2% de la población urbana que habita localidades con 20 000 habitantes o más dispone de agua potable entubada en su vivienda (Inegi, 2010).

Debe considerarse que la cobertura no garantiza la cantidad y disponibilidad del agua en los hogares, ya que existen diferencias importantes en los estándares intraurbanos de calidad en el servicio. Un estudio reciente sobre la relación de agua y pobreza en México confirma que los hogares de bajos ingresos se ven más afectados por deficiencias del servicio de agua potable y drenaje (Guevara *et al.*, 2012). El mayor contraste se presenta entre hogares de zonas rurales respecto de los urbanos, pero también hay diferencias dentro de los hogares urbanos. Una tercera parte de los hogares de bajos ingresos cuenta con una conexión a la red pública fuera de la vivienda o se abastece a través de otras fuentes, como una pipa, un pozo, un río u otra vivienda. También, comparada con los hogares no pobres, una mayor proporción de hogares de bajos ingresos recibe el servicio con interrupciones; la diferencia es de 30% en el primer caso y de 50% en el segundo. En términos de drenaje, 80% de los hogares clasificados como de bajos ingresos tiene acceso a este

servicio, en comparación con más de 90% de los hogares que no están en condiciones de pobreza (Guevara *et al.*, 2012). Esto significa que aún falta avanzar en cuanto a calidad de los servicios —especialmente en los problemas de intermitencia y calidad del líquido— y en algunos casos en el servicio de drenaje.

En nuestro país, según resultados del Censo Económico de 2014 (Inegi, 2014a), se registraron un total de 2 688 organismos operadores de agua. Su gestión ha sido fuertemente criticada, pues se caracteriza por sistemas con altas pérdidas físicas por fugas en la tubería, y baja rentabilidad comercial, que redundan en una incapacidad de manejar de forma sustentable el recurso (IMCO, 2014). En general, el sector urbano pierde aproximadamente 43% del agua en las tuberías. La Conagua generó un sistema de indicadores con el propósito de evaluar el desempeño de estos organismos, que muestra elementos de eficiencia física, comercial y global para algunas ciudades de México. El índice global arroja niveles que van de 27% de eficiencia global para Othon Blanco, Chetumal, a 62% para Tijuana (PIGGO, 2017). Cabe mencionar que el índice no considera los impactos por las externalidades generadas por la provisión del servicio de agua potable y alcantarillado (Conagua, 2018).

El financiamiento para mejorar la calidad del servicio de abasto de agua es limitado. Una parte proviene de subsidios que reciben los organismos operadores de agua, la mayoría administrados por los municipios. La recaudación de estos organismos con frecuencia está por debajo de las necesidades para cubrir el funcionamiento de los sistemas actuales (IMCO, 2014).

Conviene explicar las características de los sistemas tarifarios en ciudades para entender la insuficiente cobertura y la falta de mantenimiento del sector. En las zonas urbanas existe una mezcla de formas de pago para el servicio de abasto de agua potable, pues se combinan sistemas de servicio medido y de cuota fija. La instalación, el mantenimiento y la correcta operación de los medidores requieren un nivel relativamente alto de capacidad institucional, que por lo general desarrollan las ciudades conforme van creciendo en tamaño y actividad económica. Según información de Conagua (2016), para un consumo de 30 m³ al mes, el precio por un m³ oscila entre 36.3 pesos para la ciudad de Morelia y 4.1 pesos para la ciudad de Campeche; sin embargo, cabe destacar que esto supone un

consumo de 250 litros por persona diarios, que equivale a 2.5 veces el nivel recomendado para ciudades. Para consumos menores, el precio del agua para las tomas con servicio medido en urbes como Monterrey, Guadalajara y la Ciudad de México es de alrededor de ocho pesos por m^3 , pero hay otras donde se cobra la mitad (Soto, 2015).

En localidades que tienen servicio medido predomina el esquema de tarifas en bloques incrementales, donde se aplica un cargo fijo mínimo para el cobro de los primeros m^3 consumidos y posteriormente se asignan precios mayores dentro de los bloques sucesivos de unidades consumidas de agua. Aunque el objetivo de este esquema es desincentivar los consumos altos, se ha documentado cómo el cambio del precio del último m^3 de un bloque respecto del subsecuente es mínimo (Ramírez *et al.*, 2012). Lo anterior permite entender por qué los usuarios hacen caso omiso cuando pasan a un bloque subsecuente, pues no existe un aumento de la tarifa que los disuada de consumir una unidad adicional.

Esta variedad de estructuras tarifarias hace complicado conocer los montos que pagan los hogares dentro de una misma ciudad y, más aún, tener información confiable a escala nacional, lo cual genera la percepción de que se trata de una decisión arbitraria de las autoridades en diversos sectores de la población. Por el lado del análisis de los precios y consumos del agua, se dificulta conocer el desempeño del rubro para elaborar diagnósticos sobre la eficiencia de diferentes esquemas de provisión y cobro.

Las políticas de subsidios al agua desproporcionados se consideran un incentivo económico adverso entre la población, que podría estar induciendo sobreconsumos. El efecto consecuente es la sobreexplotación de fuentes de abastecimiento de agua, aspecto relevante dentro del debate de políticas de sustentabilidad ambiental y de equidad (Soto, 2007). Esto resalta la importancia de diseñar e implementar políticas eficientes y transparentes de precios con base en indicadores sobre el costo marginal del servicio, los costos por las externalidades y la capacidad de pago de la población. Aunque lo anterior pareciera una meta lejana para las ciudades mexicanas, ya que aún es difícil recuperar los costos directos del servicio, es recomendable informar a los tomadores de decisiones sobre las consecuencias de tener precios bajos. Las tarifas de agua se pueden utilizar como un instrumento de política que ayude a mejorar

las condiciones del servicio actual y con ello aumentar la resiliencia de la ciudad frente a los efectos del cambio climático.

Los organismos operadores de agua en México, así como en otras partes del mundo, deben evaluar un conjunto de medidas de adaptación, que, dependiendo de su contexto específico, deberán considerar impactos por sequías, inundaciones, deterioro de la calidad del agua y cambios en el ecosistema y en la demanda de los usuarios del servicio. Las medidas de adaptación que ha mencionado el IMTA (2012) para los organismos operadores de agua incluyen: 1) estrategias de planificación en materia de oferta y demanda del recurso, incluyendo la planeación del uso de suelo y acciones de colaboración entre cuencas hidrográficas y comunidades; 2) estrategias operacionales para mejorar los niveles de eficiencia, monitoreo, inspección y avances en prácticas de sustentabilidad; 3) estrategias de inversión e infraestructura para diversificar los recursos hídricos, mejorar los sistemas existentes y utilización de tecnologías e infraestructura verde, así como construcción de infraestructura para prevenir inundaciones.

Marco institucional en torno del cambio climático

A partir de la firma del Protocolo de Kioto en 1997 y su posterior ratificación en 2005, México ha desarrollado múltiples acciones para fortalecer el marco institucional y de políticas públicas que permitan al país atender el tema del cambio climático. El Comité Intersecretarial de Cambio Climático se conformó en 1997 para agrupar a varias secretarías de Estado con el objetivo de coordinarse en la atención del tema. En 2005 se modificó para dar pie a la actual Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, que ahora integran 11 dependencias federales de gobierno, incluyendo a la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, la Secretaría de Economía, la Secretaría de Desarrollo Social, la Secretaría de Economía, la Secretaría de Relaciones Exteriores, entre otras.

El Consejo de Cambio Climático lo conforman 18 especialistas en el tema y su función consiste en asesorar a la Comisión Intersecretarial. En

2007 se presentó la Estrategia Nacional de Cambio Climático que delineó los compromisos del país en materia de mitigación y adaptación. El Programa Especial de Cambio Climático 2008-2012 y 2014-2018 ha establecido en ambos periodos los objetivos y las metas en materia de mitigación y adaptación (Semarnat, 2009 y 2014). El país ha cumplido puntualmente con sus compromisos frente a la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático al elaborar y actualizar sus Inventarios Nacionales de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y sus comunicaciones nacionales (Semarnat, 2012).

En 2012 se aprobó la Ley General de Cambio Climático, donde se delimitan las competencias entre los diferentes niveles de gobierno, teniendo como coordinador al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). La ley redefine los instrumentos de planeación e información e inserta el uso de instrumentos económicos como una herramienta para el logro de los objetivos de mitigación (Semarnat, 2012). Se ha avanzado también en el desarrollo de programas estatales de acción ante el cambio climático, así como de algunos planes de acción climática municipales. Además, se ha promovido una gran cantidad de foros, talleres y publicaciones que ofrecen información sobre el tema a distintos sectores de la población. Asimismo, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) ha desarrollado el *Atlas de riesgos frente a fenómenos naturales*, que identifica áreas de alta vulnerabilidad e integra aspectos sociales y económicos de la población, aunque aún carece de escenarios de cambio climático. El INECC publicó el *Atlas nacional de vulnerabilidad climática* en 2018, donde se integran aspectos específicos de vulnerabilidad al cambio climático.

En México, desde 1995 los programas del sector hidráulico contemplaban en el Programa Nacional Hidráulico diferentes políticas y estrategias de adaptación ante el cambio climático. El Programa Especial de Prevención y Mitigación de Riesgo de Desastres 2001-2006 (Segob, 2001) reconocía la urgencia de enfrentar los efectos del calentamiento global. En 2007 se formó un grupo interdisciplinario para evaluar el efecto del cambio climático en el ciclo hidrológico y diseñar medidas para los diferentes usuarios del agua considerando diferentes escenarios climáticos. En el Plan Nacional Hídrico 2007-2012 se incorporan políticas con un enfoque preventivo (Conagua, 2008). El Programa Nacional

Hídrico 2014-2018 señala el agua como un “tema prioritario y asunto de seguridad nacional que requiere una atención integral que le permita transitar de un enfoque reactivo a uno proactivo, contar con el abastecimiento de agua necesario y fortalecer la capacidad de respuesta ante los retos asociados al cambio climático”.

El plan señala que, para alcanzar la visión del sector hídrico, es necesario reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático a través de acciones de modernización congruentes con la ley y la Estrategia Nacional de Cambio Climático. Como líneas estratégicas principales señala fortalecer los fondos financieros para rehabilitación de infraestructura hidráulica y su adaptación al cambio climático para el suministro de agua, manejo de sequías o protección contra inundaciones, con la participación y corresponsabilidad de estados y municipios. En particular, señala la necesidad de evaluar el impacto del cambio climático en la calidad del agua en cuerpos de agua prioritarios, desarrollar escenarios de cambio climático de precipitación y temperatura que permitan analizar la vulnerabilidad de la disponibilidad de los recursos hídricos y elaborar planes de adaptación en cuencas prioritarias. Dada la incertidumbre en los diferentes escenarios de cambio climático en México, se señala la importancia de impulsar acciones para incrementar el intercambio de información con las diferentes instancias nacionales e internacionales, que permita establecer estrategias de beneficio común para superar en mejores condiciones los retos climáticos a los que se enfrentará el país (Conagua, 2013).

Como reconocen los expertos en el sector, los principales desafíos para la implementación de políticas de adaptación efectivas son vencer la comunicación inadecuada entre los gobiernos centrales —que desarrollan las políticas— y los gobiernos municipales y comunitarios, así como contrarrestar la falta de recursos financieros y técnicos. La integración de políticas puede lograrse a través de la descentralización y vinculación de los actores locales, así como con la inversión en investigación, educación, monitoreo del agua y concientización (Okpara *et al.*, 2018).

3. Características hídricas de la zmcM

Este capítulo describe las características hídricas de la cuenca del valle de México. Se explican la naturaleza y los orígenes de los problemas desde una perspectiva física, para entender los problemas actuales asociados con la disponibilidad del agua y considerar las oportunidades y los riesgos que pueden presentarse a partir de alteraciones en el sistema de precipitación derivados del cambio climático. Es importante conocer los antecedentes históricos para comprender el proceso de ocupación de la cuenca y los patrones de crecimiento demográfico, así como los datos sobre la localización geográfica de la ciudad e información alusiva al clima, incluyendo temperatura y precipitación. La edafología, en términos de usos de suelo y tipos de suelo predominantes, así como la geología que caracteriza a la cuenca, permiten tener datos puntuales que describen las características del acuífero, el cual es fundamental para entender la cantidad y la calidad de agua disponible con que cuenta la zmcM a escala local.

Antecedentes

Antes de la conquista de la gran Tenochtitlan, los manantiales de Chapultepec eran la fuente principal de abasto de agua. Posteriormente, a mediados del siglo XIX, con la desecación de los lagos se inició la explotación del

hoy denominado acuífero de la ZMCM, que desde entonces ha sido la fuente más importante de suministro del líquido de la población de la Ciudad de México y de los municipios conurbados del Estado de México.

Durante el siglo xx la Ciudad de México presentó un crecimiento demográfico exponencial debido no solamente al aumento natural de la población asentada de manera local, sino también a la migración producida por la centralización, que ofrecía la oportunidad de empleo e ingresos más altos, oferta de servicios más económicos, acceso al suelo y vivienda, etcétera. Entre 1940 y 1970, la densidad poblacional se elevó a un promedio anual de 5%, provocando que para 1980 la superficie de la Ciudad de México se expandiera de forma desordenada sobre 50% de suelos de propiedad ejidal o comunal. Como consecuencia de esa explosión demográfica, los municipios aledaños a la metrópoli quedaron conurbados. En 1986, la población migrante representaba 24.6% del total de la población residente en la ZMCM. A partir de 1990 el crecimiento descendió a 1.7% anual, debido principalmente a la disminución de la tasa de natalidad y al descenso de la migración neta por la saturación del espacio físico, la oferta insuficiente de servicios públicos, la reducción significativa del empleo formal, la inseguridad y el deterioro de la calidad de la vida y del ambiente (Inegi, 1991 y 2001). En la actualidad, la ZMCM está formada por 16 alcaldías de la Ciudad de México, y por 60 municipios conurbados del Estado de México y de Hidalgo (Inegi, 2010). En conjunto, la ZMCM es el centro cultural, económico e industrial de la República mexicana. En ella se localiza 45% de la actividad industrial nacional y se genera 38% de su PIB (Inegi, 2010).

Dado el rápido crecimiento poblacional, el patrón de expansión urbana ha carecido de planeación y ha propiciado que la infraestructura para la provisión de los servicios públicos sea siempre insuficiente. Las autoridades, tanto locales como federales, no han podido planear el crecimiento y el desarrollo, ni proveer a todos los habitantes, con la siempre progresiva demanda, de servicios de agua potable y tratamiento de aguas residuales (Arredondo, 2007).

Figura 3. Mapa de la ZCMV que muestra el área de conservación y el área de desarrollo urbano



Localización y clima de la ZMCM

La ZMCM se ubica en la parte central del cinturón volcánico transmexicano, en un valle a 2 400 metros sobre el nivel del mar (msnm), rodeado de sierras de origen volcánico con cumbres que alcanzan alturas superiores a los 5 000 metros.

Los factores que controlan el clima de la región son latitud, altitud, topografía, proximidad a masas de agua y circulaciones atmosféricas dominantes. El clima de la ZMCM, por su régimen de lluvia y por la altitud en la que se ubica, es considerado tropical-atemperado (Jáuregui, 2000). La temperatura media anual varía entre 12 y 18 °C, con valores máximos en abril y mayo hasta de 33.5 °C y mínimos durante diciembre y enero hasta de -1 °C. En las partes planas se presentan las temperaturas más altas y en las zonas montañosas de la Sierra del Ajusco y la Sierra Nevada se presentan las temperaturas más bajas. Las variaciones de temperatura pueden ser hasta de 15 °C, lo que permite dividir la estación de secas en las subestaciones *seca-caliente* de marzo a mayo y *seca-fría* de noviembre a febrero.

La ZMCM presenta un régimen anual definido de precipitación entre los meses de junio a octubre, el cual está relacionado con la intensidad y frecuencia de fenómenos meteorológicos sinópticos en las costas del Pacífico y el Atlántico. Los otros meses son de sequía, aunque pueden tener lugar lluvias aisladas. La precipitación media anual es de alrededor de 700 mm; aumenta con la elevación y se incrementa de noreste a suroeste. Los niveles más altos de precipitación se registran en las zonas montañosas y los más bajos en la zona oriente.

Edafología y geología de la ZMCM

La Ciudad de México se divide en dos grandes zonas con base en el uso del suelo y la delimitación de los asentamientos humanos: el área de desarrollo urbano y el suelo de conservación. Su superficie está conformada por 59.49% (884.42 km²) de suelo de conservación y 40.51% (602.03 km²) de zona urbana (véase figura 3). La declaratoria de la línea limítrofe entre el área de desarrollo urbano (área urbana) y el área

de conservación ecológica (suelo de conservación) fue publicada en la *Gaceta Oficial* del entonces Departamento del Distrito Federal (hoy Gobierno de la Ciudad de México), el 5 de octubre de 1992.

La importancia del suelo de conservación estriba en que es la zona de recarga natural del acuífero de la ZMCM. En la tabla 4 se muestra la capacidad de infiltración de los diferentes tipos de suelo presentes en la Ciudad de México. En su porción media-baja se manifiesta una precipitación promedio anual que fluctúa entre 600 y 800 mm/año, mientras que en su parte alta los valores oscilan entre 800 y 1 500 mm/año (OPMAC-Ecofin, 2000).

El principal uso del suelo de conservación de la Ciudad de México corresponde al sector forestal (42% de la superficie total) con bosques distribuidos aproximadamente en 37 400 ha, la agricultura representa cerca de 35 000 ha y el resto está constituido por matorrales, pastizales, vegetación introducida y uso urbano.

Tabla 4. Tipos de suelos de la Ciudad de México y su capacidad de infiltración

| Tipo de suelo | Características | Capacidad de infiltración |
|---------------|---|---------------------------|
| Andosol (T) | Suelos ricos en vidrio volcánico. En condiciones naturales tienen vegetación de pino, abeto, encino, etcétera, con una capa superficial de color negro. Muy susceptibles a la erosión. | Media |
| Cambisol (B) | Suelos cuya estructura y consistencia son producto de la meteorización <i>in situ</i> . Presentan cualquier tipo de vegetación y en el subsuelo tienen una capa de terrones con alguna acumulación de arcilla, calcio, etcétera. Susceptibilidad de moderada a alta a la erosión. | Lenta |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| Feozem (H) | Suelos ricos en materia orgánica. En condiciones naturales tienen casi cualquier tipo de vegetación, se hallan en terrenos planos hasta montañosos y su susceptibilidad a la erosión depende del tipo de terrenos donde se encuentre. | Media |
| Fluvisol (J) | Suelos formados por materiales de depósito aluviales; están constituidos por material suelto que no forma terrones y son poco desarrollados. La vegetación varía desde selva hasta matorrales y pastizales. | Rápida |
| Gleysol (G) | Se encuentra en zonas donde se acumula y estanca el agua, al menos en la época de lluvias. Su vegetación natural es de pastizal. Estos suelos en ocasiones presentan acumulación de sales. Son poco susceptibles a la erosión. | Muy lenta |
| Histosol (O) | Suelos ricos en materia orgánica sin descomponer o parcialmente en estado de biodegradación. Se encuentran en zonas pantanosas o en los lechos de antiguos lagos. | Media |
| Litosol (Y) | Suelos de poco desarrollo con la roca dura subyacente a poca profundidad. Vegetación diversa, son suelos sin desarrollo, con profundidad menor de 10 cm y tienen características muy variables, según el material que los forma. | Media |
| Luvisol (L) | Suelos con acumulación de arcilla en el subsuelo, su vegetación natural es de selva o bosque, son rojos o claros y moderadamente ácidos. Son suelos de susceptibilidad alta a la erosión. | Lenta |

| | | |
|---------------|--|-----------|
| Planosol (W) | Suelos de material ácido e infértil con subsuelo arcilloso e impermeable, roca o tepetate; su vegetación natural es de pastizal. Son muy susceptibles a la erosión. | Lenta |
| Regosol (R) | Suelos con poco o escaso desarrollo y vegetación diversa. Su susceptibilidad a la erosión es muy variable y depende del terreno en el que se encuentre. | Media |
| Solonchak (Z) | Se caracteriza por presentar un alto contenido en sales y su vegetación es escasa tipo pastizal o plantas que toleran las sales. Son poco susceptibles a la erosión. | Muy lenta |
| Vertisol (V) | Suelos duros, arcillosos, frecuentemente negros, grises y rojizos. Su susceptibilidad a la erosión es baja. | Muy lenta |

Fuente: Inegi, 1989 y 2000.

El suelo de conservación enfrenta un sostenido proceso de degradación de sus recursos naturales. De manera progresiva la zona ha ido perdiendo los ecosistemas que facilitan la recarga y su lugar está siendo ocupado por asentamientos humanos irregulares que la cancelan (OPMAC, 2000). Se estima que el incremento de la mancha urbana ha reducido la infiltración promedio en las alcaldías de la Ciudad de México de 228.2 Mm³ en 1970 a 155.5 Mm³ en 2000, y de 86.7 Mm³ a 68.8 Mm³ en los municipios conurbados, durante los mismos periodos.

Los detalles de la geología subsuperficial han sido descritos por Mooser (1988) y por Mooser y Molina (1993), quienes identificaron tres zonas hidrológicas principales para el valle de México: la zona lacustre, el piedemonte o zona de transición y la zona montañosa. La primera corresponde a las elevaciones de menor altura. La región piedemonte se encuentra entre el lecho de los antiguos lagos y las montañas de mayor pendiente y se compone en gran medida de basalto fracturado de flujos

volcánicos. La formación de basalto es altamente permeable, con una buena capacidad de almacenamiento; se encuentra expuesta cerca de la porción superior del piedemonte y se extiende por debajo de los depósitos aluviales del valle. El piedemonte, conocido también como zona de transición, es importante para la recarga natural del acuífero. Las montañas que circundan la cuenca de México son de origen volcánico. La zona del acuífero está limitada principalmente por dos grandes estructuras tectovolcánicas que se diferencian entre sí por su edad geológica y por sus características morfológicas y litológicas; éstas son las sierras de Las Cruces y del Chichinautzin.

En la zona del parteaguas de la sierra se identifican 19 circos de erosión o depresiones, con un ancho promedio de 1.5 kilómetros (Lugo, 1984). La sierra Chichinautzin, en el sur, cuenta con 3 600 msnm de altitud y un relieve volcánico acumulativo; es una estructura joven del Pleistoceno Superior-Holoceno, forma la cadena más reciente y es la zona de recarga natural del acuífero de la ZMCM debido a la alta permeabilidad de su roca de basalto.

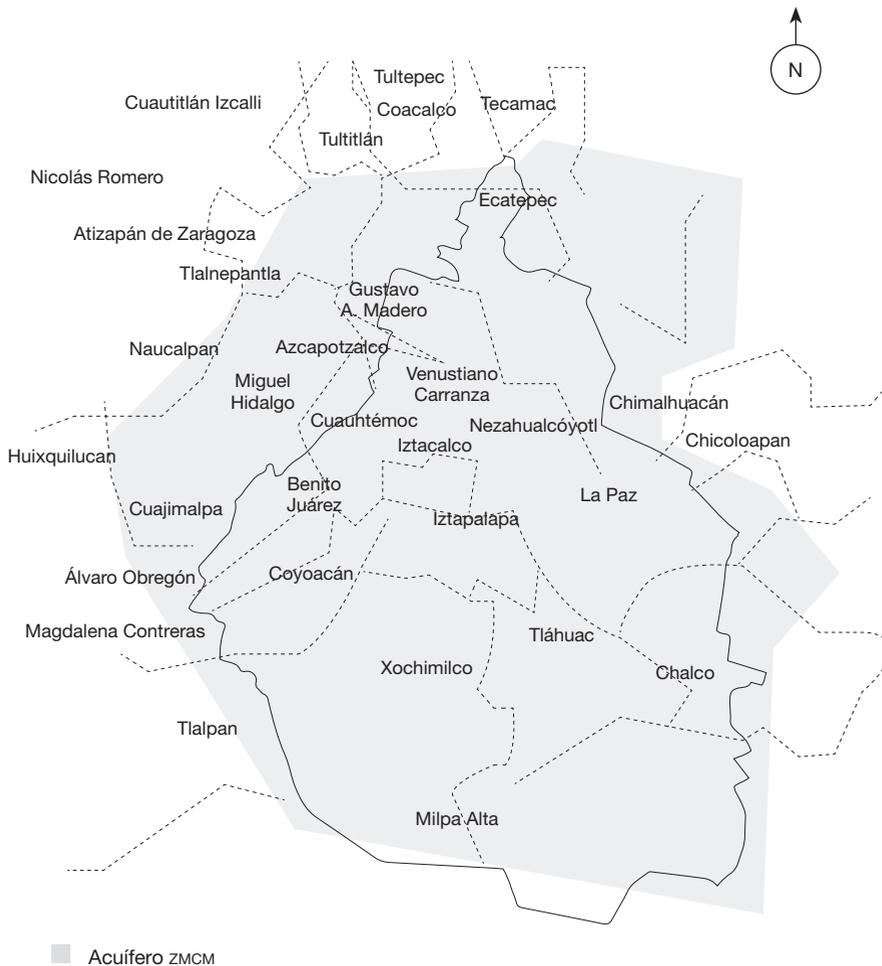
Acuífero de la ZMCM

Regionalmente, el subsuelo del valle de México está constituido por una secuencia de aluviones y productos volcánicos, ambos permeables, que permiten la infiltración y circulación de agua subterránea y dan origen a un acuífero (véase figura 4). En el centro del valle se encuentra un cuerpo de arcillas lacustres que funciona como acuitardo debido a su reducida permeabilidad. El subsistema acuífero se halla confinado por las arcillas lacustres en la porción oriental del valle, pero en la porción occidental funciona como acuífero libre.

La recarga principal del acuífero proviene de la infiltración del agua que se precipita sobre las sierras que lo circundan, en especial en la porción sur, debido a la alta permeabilidad de las rocas que existen en esa zona. El agua infiltrada circula en forma radial de los flancos de las sierras al centro del valle. Las fuentes de recarga del agua subterránea son en gran medida las precipitaciones infiltradas y la nieve derretida en las montañas y en los cerros que la rodean. Los grandes manantiales de

Xochimilco constituyen un punto de descarga del flujo subterráneo, aunque la descarga principal del acuífero se lleva a cabo mediante el bombeo de los pozos perforados en el valle y no se manifiesta una descarga hacia otras cuencas, debido a que la del valle de México es una cuenca endorreica y, por lo tanto, sin salidas naturales del agua.

Figura 4. Delimitación del acuífero de la ZMCM



Las unidades hidroestratigráficas del acuífero se agrupan en cuatro clasificaciones principales (véase tabla 5). La unidad superior de baja permeabilidad o acuitardo superior está conformada por depósitos lacustres del Cuaternario que afloran en la planicie de la ciudad. Las unidades superiores permeables conforman el acuífero superior en la mayor parte de la planicie de la Ciudad de México. Este acuífero granular-mixto-fracturado se encuentra subyaciendo a las arcillas lacustres. De él se extrae la mayor parte del agua subterránea para la capital del país.

Tabla 5. Unidades hidroestratigráficas en el acuífero de la ZMCM

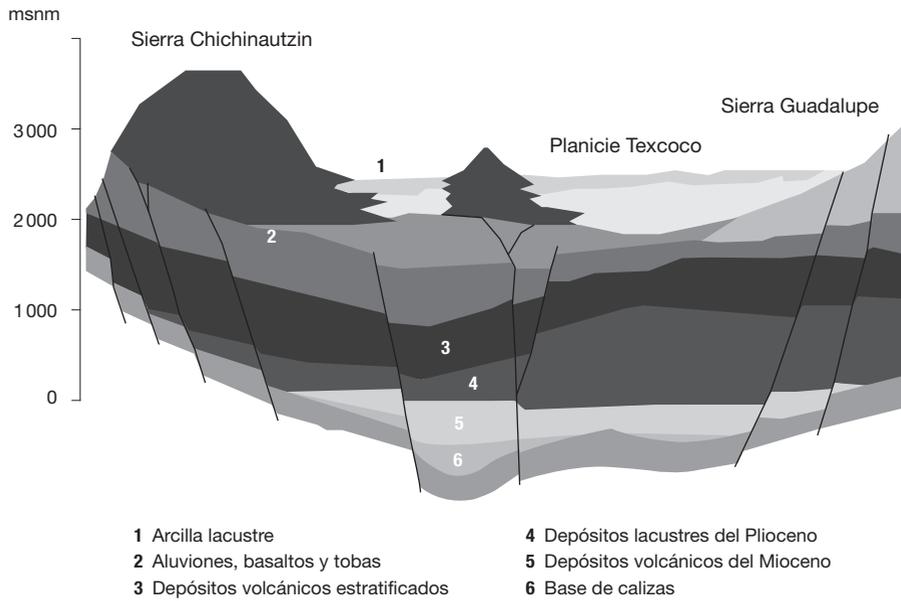
| Clasificación hidroestratigráfica | Litología | Espesor promedio (m) |
|---------------------------------------|---|----------------------|
| Unidad superior de baja permeabilidad | Arcilla lacustre | 60 |
| Unidad superior permeable | Aluviones, basaltos y tobas | 600 |
| Unidad inferior de baja permeabilidad | Arcilla lacustre, rocas ígneas, areniscas, lutitas y carbonatos compactos | 1500 |
| Unidad inferior permeable | Calizas | 500 |

Fuente: Adaptado de SACM-IMTA, 2006a.

Las áreas de recarga están establecidas hacia las sierras que las limitan (Guadalupe, Las Cruces, Chichinautzin y Santa Catarina); las áreas de descarga inducida se hallan representadas por la zona de influencia de los pozos, ubicados principalmente en la planicie, y entre ambas, se cuenta con las áreas de transferencia, regularmente conformadas por las zonas de piedemonte, mismas que en la actualidad han sido modificadas hidrodinámicamente debido al bombeo de los pozos ubicados en ellas. El flujo subterráneo se genera en las partes altas, en la sierra de Las Cruces; tiene una dirección principal de poniente a oriente. El gradiente del flujo es de aproximadamente 0.02 y se mantiene más o menos uniforme

en la porción occidental del valle. Decece a 0.007 en la zona de Azcapotzalco, donde se aprecia un cono de abatimiento que intercepta flujo de la parte oriental. En lo que se refiere a la porción media del acuífero, zona de Álvaro Obregón, Magdalena Contreras, Benito Juárez y Coyoacán, la configuración de la elevación piezométrica indica que la carga hidráulica varía de 2 355 a 2 170 msnm. Al igual que en el caso anterior, el flujo subterráneo se genera en la sierra de Las Cruces, tiene una dirección principal de poniente a oriente y alimenta las partes bajas de la cuenca. El gradiente del flujo varía aproximadamente de 0.022 a 0.028 en las estribaciones de esta sierra y decece a 0.0025 en la zona que se localiza al poniente del Cerro de la Estrella, en donde se delinea un cono de abatimiento que intercepta flujo subterráneo de la parte oriental, proveniente de la sierra Santa Catarina.

En la parte sur de la cuenca, zona de Xochimilco y Tláhuac, la configuración de la elevación piezométrica muestra que la carga hidráulica varía de 2 225 a 2 170 msnm (SACM-ITA,2006a) y que el flujo subterráneo se genera en la sierra de Chichinautzin; tiene una dirección principal de sur a norte y cambia de norte a oeste a medida que se acerca al Cerro de la Estrella. El gradiente del flujo varía de 0.014 a 0.025 en las estribaciones de la sierra y decece de manera significativa a 0.0025 en el área aledaña al cono de abatimiento que se localiza al poniente del Cerro de la Estrella. La porción norte del acuífero recibe recarga proveniente de la Sierra de Guadalupe, la carga hidráulica varía de 2 245 msnm en las estribaciones de la sierra a 2 180 msnm en las partes bajas. La dirección del flujo va al suroeste en la parte de Azcapotzalco y al sur en la zona de Gustavo A. Madero. La Sierra Santa Catarina se manifiesta como área limítrofe de recarga para los acuíferos de la Ciudad de México al poniente, Chalco-Amecameca al sureste y Texcoco al norte-noreste (véase figura 5).

Figura 5. Corte transversal del acuífero de la ZMCM

4. Balance hídrico de la zMCM

Para poder evaluar el impacto del cambio climático es necesario revisar la información histórica disponible al respecto y realizar un análisis de cómo el clima de la zMCM ha variado en las últimas décadas. Este capítulo describe las características de la temperatura y la precipitación a partir de datos históricos que permiten observar las tendencias entre 1961 y 1990, diferenciando las características del suelo urbano y de conservación. Este análisis permite distinguir el comportamiento en ambos tipos de suelo y confirmar que existe un cambio en los patrones de precipitación y temperatura de la zMCM, aunque no necesariamente están asociados con el fenómeno de cambio climático. El capítulo explica la metodología empleada para estimar la disponibilidad de agua de la zMCM. Valores promedios de precipitación, evapotranspiración real y precipitación efectiva fueron calculados para el periodo 1961-1990 para la zona urbana y para el área de conservación de la zMCM. Dichos valores se utilizan más adelante como base para comparar los resultados de las simulaciones escaladas de los modelos de circulación global (MCGs) y evaluar los posibles impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

Tendencias climáticas de la ZMCM

En esta investigación se utilizó el periodo 1961-1990 como punto de partida estándar contra el cual comparar los efectos del cambio climático, debido a que en ese lapso la temperatura media mundial permaneció estable. Por esa razón, datos diarios de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación de dicho periodo de 30 años han sido usados para calcular promedios de evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y recarga para las zonas norte y sur de la ZMCM. Los datos se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional, organismo encargado del acopio de la información climatológica dentro del territorio mexicano.

En la ZMCM la temperatura media anual para el periodo 1961-1990 varió de 12 a 18 °C, con valores máximos hasta de 32.5 °C en abril y mayo y mínimos hasta de -1 °C durante diciembre y enero. Las temperaturas más altas se presentaron en el centro y en el norte. Las más bajas, en las zonas montañosas del sur.

A partir de 1983 los valores de temperatura media anual mostraron un incremento tanto en la zona urbana de la ZMCM como en la zona de conservación (véanse figuras 6 y 7). Este aumento se debe principalmente a los cambios en las temperaturas máximas y es más marcado en la zona urbana; esta diferencia puede explicarse por el fenómeno conocido como “isla de calor”, el cual eleva la temperatura del aire en los centros urbanos densamente construidos, como resultado de la combinación del uso de materiales absorbentes de calor, falta de espacios verdes, actividad industrial, uso de energéticos y gases contaminantes.

Para cuantificar el volumen de precipitación en la ZMCM se utilizó el método de los polígonos de Thiessen, que consiste en delimitar áreas de influencia a partir de un conjunto de puntos para determinar la lluvia promedio de una zona. Los valores más altos se presentaron en la zona montañosa, con rangos de precipitación de más del doble que en el resto de la ciudad. En el norte y el oriente las precipitaciones calculadas presentaron valores más bajos.

Durante el periodo de estudio, en la zona urbana de la ZMCM se observó un decremento en la precipitación media anual (véase figura 8), mientras que en la zona de conservación se presentó un ligero incremento (véase figura 9). Durante este periodo, las precipitaciones con una

Figura 6. Tendencia de la temperatura media anual en la zona urbana de la ZMCM en el periodo histórico 1961-1990

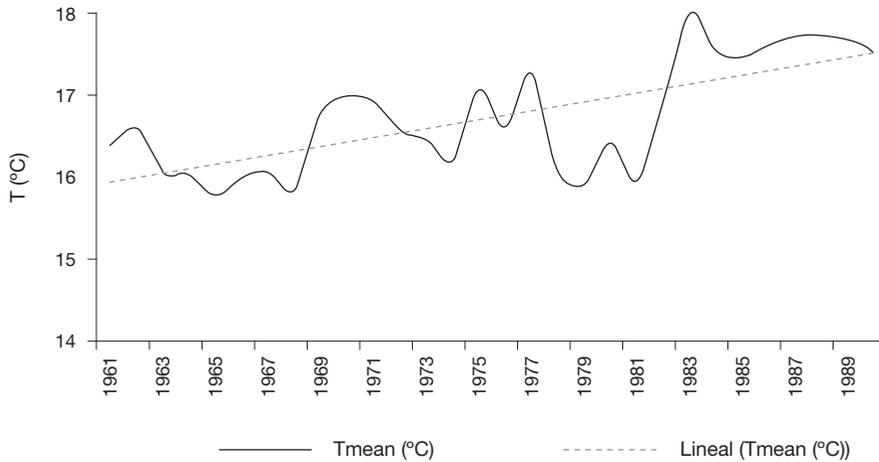
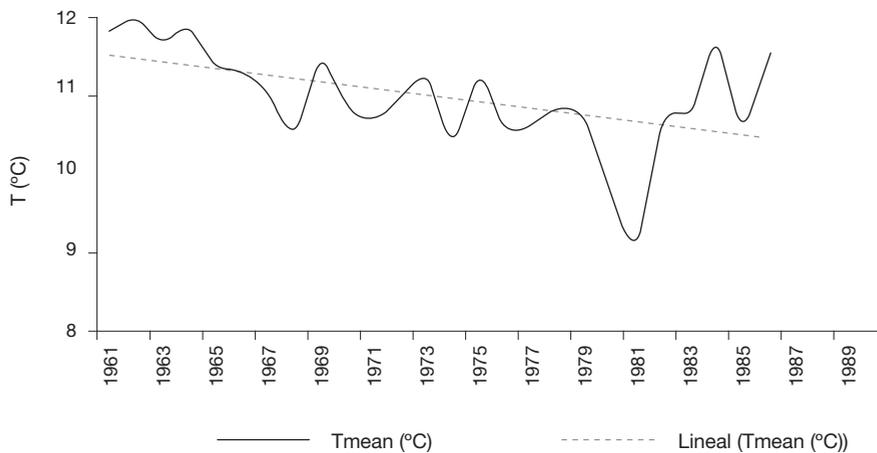
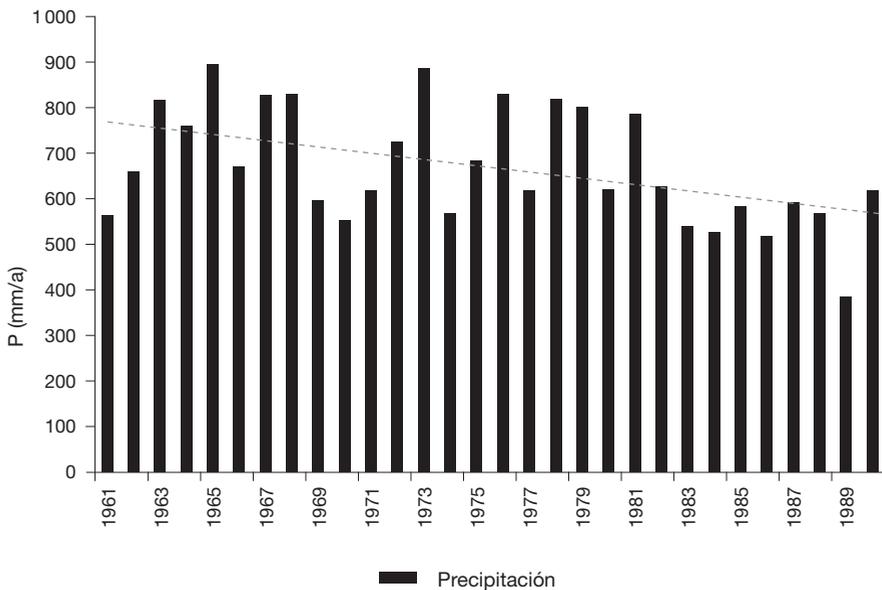


Figura 7. Tendencia de la temperatura media anual en la zona de conservación de la ZMCM en el periodo histórico 1961-1990



intensidad de 30 a 40 mm en 24 horas son las más frecuentes, registrándose casi 180 eventos en los 30 años de análisis. Los eventos con una intensidad mayor a 70 mm en 24 horas fueron los más raros, con ocurrencia menor de 20 de ellos durante las referidas tres décadas (véase figura 10).

Figura 8. Variación de la precipitación media anual en la zona urbana de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990



Balance hídrico de la ZMCM

El ciclo hidrológico es un proceso continuo mediante el cual el agua del planeta permanece siempre en movimiento y en constante cambio de estado físico. Los principales procesos implicados en el ciclo del agua son: evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía superficial, flujo subterráneo y almacenamiento.

Figura 9. Variación de la precipitación media anual en la zona de conservación de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990

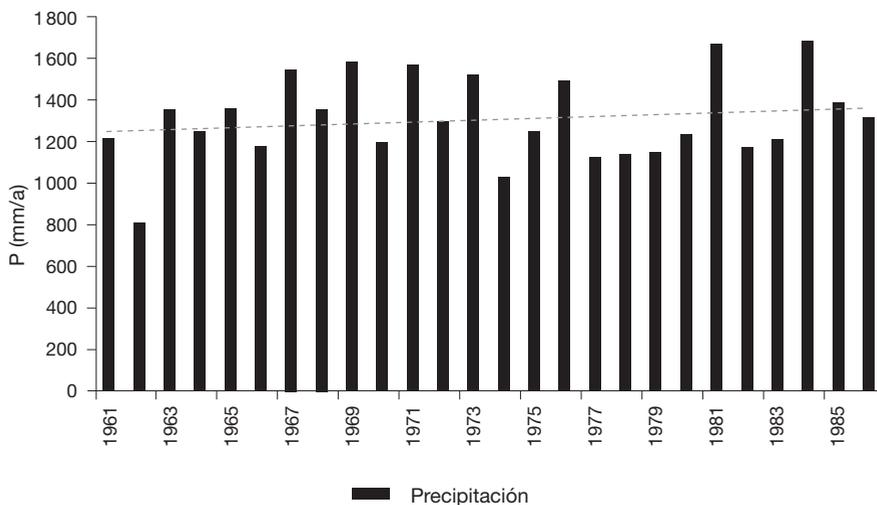
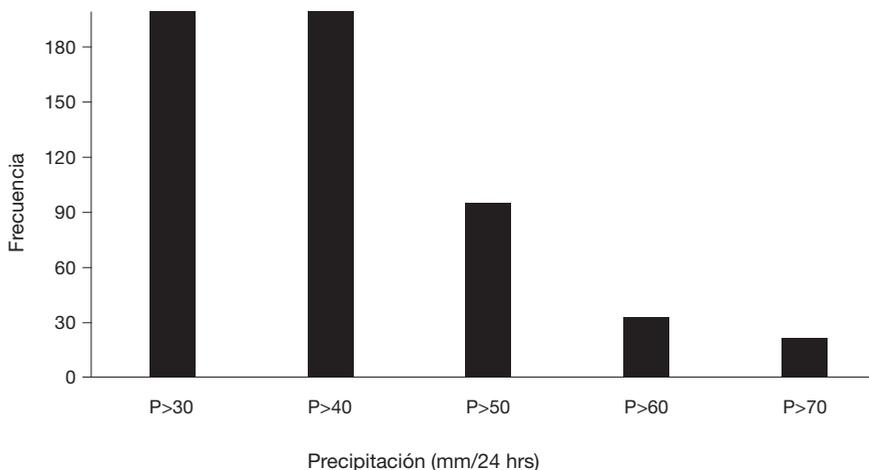


Figura 10. Frecuencia de la intensidad de los eventos de precipitación en la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990



El balance hídrico describe el flujo de agua dentro y fuera de un sistema. Se basa en el principio de conservación de la materia, por lo que es el método más adecuado para determinar la disponibilidad de agua en una cuenca dada, durante un tiempo específico, y consecuentemente es esencial en el manejo y la gestión del vital líquido. La ecuación general del balance hídrico es:

$$\text{PRECIPITACIÓN} = \text{ESCORRENTÍA} + \text{EVAPOTRANSPIRACIÓN} + \Delta \text{ALMACENAMIENTO} + \text{INFILTRACIÓN}$$

- Donde:
- Precipitación: el producto de la condensación del vapor de agua atmosférico que se deposita en la superficie de la Tierra.
 - Escorrentía: el volumen de agua que circula sobre la superficie del terreno.
 - Evapotranspiración: agua que regresa a la atmósfera como consecuencia de la evaporación y la transpiración de las plantas.
 - Δ Almacenamiento: cambio en la cantidad de agua almacenada en las rocas y el suelo, tanto superficial como subterránea.
 - Infiltración: proceso por el cual el agua de la superficie del suelo drena hacia capas inferiores

Según la definición oficial de la Organización Meteorológica Mundial, la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua, de diámetro mayor a 0.5 mm. Un gran volumen de agua que se precipita sobre la superficie terrestre vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación, que son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de la energía solar. La evaporación es el proceso por el cual el agua líquida de océanos, mares, lagos y ríos ingresa a la atmósfera en forma de vapor. El vapor de agua del aire se transforma en agua líquida a través de la condensación que forman las nubes. Estas nubes pueden producir precipitación, forma principal por la que el agua regresa a la tierra. Parte de la lluvia que cae se infiltra en el suelo y otra se escurre. Y parte del agua que se infiltra permanece en las capas más superficiales del suelo y puede volver a entrar a una corriente de agua, mientras que otra porción del agua puede infiltrarse más profundamente y recargar los acuíferos. El agua que cae sobre suelo saturado o impermeable comienza a correr en su superficie, siguiendo su propia pendiente, y llega a ríos y arroyos que se descargan en los océanos.

Para estimar la evapotranspiración potencial ha sido propuesto un gran número de métodos: Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998; Hess, 1996), Priestley-Taylor (1972), Hargreaves-Samani (1982), Thornthwaite-Mather (1955), Penman-Grindley (1969), Mishra-Singh (2003), etcétera. La ecuación de Penman-Monteith es considerada la más completa y confiable (Hess, 1996). Sin embargo, dado el gran número de parámetros que requiere para su aplicación, no fue posible utilizarla para los cálculos en la ZMCM.

En su lugar se empleó la ecuación de Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), ya que sólo requiere datos de temperatura y radiación:

$$ET = 0.0023(T_m + 17.8) (T_{\max} - T_{\min})^{0.5} Ra$$

Donde: ET = evapotranspiración (mm día⁻¹)
 T_m = temperatura promedio diaria (°C)
 T_{max} = temperatura máxima diaria (°C)
 T^{min} = temperatura mínima diaria (°C)
 Ra = radiación extraterrestre (mm día⁻¹)

La capacidad de infiltración de un suelo es la cantidad de lluvia que puede absorber por unidad de tiempo, por lo que ésta dependerá de la intensidad pluvial, el tipo de suelo, el uso del suelo, la cubierta vegetal y la humedad inicial. Parte del agua suele quedar retenida en la capa no saturada y estar disponible para ser transpirada por las plantas en la franja de penetración de las raíces o para evaporarse por la acción de la energía solar sobre la superficie del terreno. Otra porción del agua que se infiltra puede alcanzar la zona saturada del sistema acuífero una vez superada la capacidad de retención del suelo (Mishra, 2003). La dirección y la velocidad del movimiento del agua subterránea están determinadas por las características del acuífero y de las capas confinadas del suelo. El flujo del agua subterránea depende de la permeabilidad y de la porosidad del suelo (Hiscock y Bense, 2014).

Para determinar la infiltración de la ZMCM se consideraron valores de infiltración mediante el uso de las cartas edafológicas del Inegi (1989),

a escala 1:50000, así como los correspondientes a los distintos suelos de la citada zona, reportados por Ortiz y Ortiz (1990) (véase tabla 6).

Tabla 6. Capacidad de infiltración por tipo de suelo de la ZMCM

| Tipo de suelo | Capacidad de infiltración (lámina de agua/hora) | |
|---------------|---|----------------|
| Andosol | Media | 1.75 a 2.5 cm |
| Cambisol | Lenta | 0.25 a 1.75 cm |
| Feozem | Media | 1.75 a 2.5 cm |
| Fluvisol | Rápida | > 2.5 cm |
| Gleysol | Muy lenta | < 0.25 cm |
| Histosol | Media | 1.75 a 2.5 cm |
| Litosol | Media | 1.75 a 2.5 cm |
| Luvisol | Lenta | 0.25 a 1.75 cm |
| Planosol | Lenta | 0.25 a 1.75 cm |
| Regosol | Media | 1.75 a 2.5 cm |
| Solonchak | Muy lenta | < 0.25 cm |
| Vertisol | Muy lenta | < 0.25 cm |

Fuente: A partir de Ortiz y Ortiz, 1990.

Otros aspectos importantes considerados en el proceso de infiltración fueron la temperatura y la urbanización, ya que el incremento de la primera origina un aumento del proceso de evapotranspiración, mientras que la segunda reduce de manera sustancial las zonas permeables superficiales.

En la tabla 7 se muestra la variación de la superficie urbana para cada una de las alcaldías y municipios de la zona en estudio; en ella se aprecia que, para el caso particular de la alcaldía Magdalena Contreras, la mancha urbana se incrementó notablemente al pasar de una superficie de 14.3% en la década de 1980 a casi 50% en 2000. Un elemento importante que

hay que tomar en cuenta dentro del balance hídrico es la recarga inducida por fugas en el sistema de agua potable y alcantarillado. En el proyecto SACM-IMTA (2006a) se reporta que estas pérdidas en dichas redes pertenecientes a la Ciudad de México y al Estado de México representan 32% del volumen abastecido; equivalen a cerca de $5.88 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la capital del país y $6.71 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en la entidad mexiquense. Los autores consideraron que de este volumen el caudal a tomar en cuenta como posible recarga inducida al sistema acuífero es de 10%, aproximadamente.

Tabla 7. Variación del crecimiento de la mancha urbana en la ZMCM; incluye las 16 alcaldías de la Ciudad de México y nueve municipios del Estado de México

| Alcaldías / municipios | 1970-1979 (%) | 1980-1989 (%) | 1990-1999 (%) | 2000-2010 (%) |
|------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Álvaro Obregón | 48.30 | 54.90 | 61.40 | 66.00 |
| Azcapotzalco | 82.80 | 89.50 | 96.30 | 100.00 |
| Benito Juárez | 91.20 | 93.60 | 97.70 | 100.00 |
| Coyoacán | 86.30 | 98.10 | 99.30 | 100.00 |
| Cuajimalpa de Morelos | 5.20 | 6.80 | 13.30 | 21.80 |
| Cuauhtémoc | 90.60 | 93.50 | 97.70 | 100.00 |
| Gustavo A. Madero | 75.70 | 82.10 | 84.30 | 86.50 |
| Iztacalco | 92.20 | 94.90 | 98.20 | 100.00 |
| Iztapalapa | 49.00 | 68.20 | 83.60 | 95.60 |
| Magdalena Contreras | 10.40 | 14.30 | 28.40 | 45.70 |
| Miguel Hidalgo | 84.70 | 89.60 | 96.30 | 100.00 |
| Milpa Alta | 1.50 | 1.90 | 3.90 | 6.60 |
| Tláhuac | 18.40 | 24.20 | 30.50 | 35.00 |
| Tlalpan | 11.00 | 14.30 | 15.40 | 16.20 |

| | | | | |
|----------------------|-------|-------|-------|--------|
| Venustiano Carranza | 86.60 | 91.80 | 87.10 | 100.00 |
| Xochimilco | 15.40 | 18.70 | 19.50 | 21.10 |
| Atenco | 1.50 | 4.10 | 17.30 | 35.50 |
| Atizapán de Zaragoza | 15.50 | 27.80 | 42.40 | 54.70 |
| Ecatepec de Morelos | 25.10 | 39.00 | 51.10 | 56.60 |
| Huixquilucan | 2.40 | 4.60 | 7.70 | 10.60 |
| Naucalpan de Juárez | 28.40 | 37.00 | 44.20 | 52.60 |
| Nezahualcóyotl | 79.60 | 81.70 | 83.40 | 84.20 |
| La Paz | 25.50 | 35.00 | 42.30 | 45.60 |
| Tlalnepantla de Baz | 52.70 | 64.60 | 70.50 | 73.70 |
| Valle de Chalco | 42.20 | 45.20 | 47.50 | 48.50 |

Fuente: Inegi, 1981, 1991 y 2010.

Disponibilidad de agua en la ZMCM

En términos generales, en la ZMCM la disponibilidad del agua depende de la precipitación que produce la recarga al acuífero y el escurrimiento superficial. La recarga a un acuífero puede ocurrir en forma directa o indirecta (Wheater *et al.*, 2007). La recarga directa ocurre por infiltración de la precipitación. Sin embargo, no toda el agua que se filtra se convierte en recarga real, ya que alguna cantidad se desvía como interflujo, que es la precipitación que no se ha filtrado hasta el nivel freático (Church, 2005).

La recarga indirecta puede ocurrir por infiltración de agua superficial, interflujo y escurrimiento de áreas menos permeables (Maréchal, 2009). Hay varios métodos para calcular la recarga a un acuífero: por medio de instrumentos de percolación, por medición de los cambios en los niveles del agua subterráneos, por utilización de modelos de balance del agua, etcétera. El método convencional de balance de humedad del suelo de Penman-Grindley (Penman, 1948, 1950; Grindley, 1967, 1969; Howard y Lloyd, 1979) considera la recarga como una función de la precipitación efectiva. Para calcular la precipitación efectiva de cada tipo y

uso de suelo en la ZMCM se utilizó una versión modificada de este método (Herrera-Pantoja y Hiscock, 2008) en el cálculo de la recarga potencial o la precipitación efectiva (Hxr). Esta definición de precipitación efectiva incluye tanto la precipitación que se infiltra como el interflujo y el escurrimiento. En el procedimiento se emplearon valores diarios de agua aprovechable (AWC) y su porcentaje correspondiente de agua de fácil acceso (FAW), para indicar la velocidad a la que ocurren el déficit de humedad de suelo, la evapotranspiración real y la recarga potencial. La pérdida del agua o la evapotranspiración real (AE) son calculadas como una función del contenido hídrico del suelo, las características de la vegetación y la evapotranspiración potencial (PE). Cuando la precipitación sobrepasa la evapotranspiración potencial, el agua se infiltra y el déficit de humedad del suelo disminuye. La recarga potencial ocurre cuando no hay déficit de humedad en el suelo. Cuando la evapotranspiración potencial sobrepasa la precipitación, el déficit de humedad del suelo aumenta hasta el punto en que FAW se agota y AE disminuye su velocidad a un valor de $AE/PE = 0.1$ hasta que el máximo valor AWC es alcanzado, después del cual no es posible que AE se produzca. Los parámetros de AWC y FAW fueron valorados para las diferentes zonas.

Las tablas 8 y 9 muestran los valores promedio anuales de precipitación, evapotranspiración real y precipitación efectiva, calculados para el periodo histórico 1961-1990, en la zona urbana y en el área de conservación de la ZMCM. Estas series de datos son comparables con las reportadas en la literatura (SACM-IMTA, 2006a; 2006b). Las precipitaciones promedio anuales obtenidas para la zona urbana están entre los rangos de 384 mm a^{-1} y 894 mm a^{-1} con un promedio de 668 mm a^{-1} como valor medio para el periodo de 30 años. Los valores de precipitación obtenidos para la zona de conservación fueron más altos, pues arrojan cifras entre 802 mm a^{-1} y $1\,676 \text{ mm a}^{-1}$, con una estimación media de $1\,306 \text{ mm a}^{-1}$ para el periodo histórico 1961-1990. Los valores promedio anuales de evapotranspiración real oscilaron entre 378 mm a^{-1} y 458 mm a^{-1} para la zona urbana, y entre 364 mm a^{-1} y 548 mm a^{-1} para la zona de conservación, con lecturas para el mismo periodo de 410 mm a^{-1} y 452 mm a^{-1} , respectivamente. El rango para la zona de conservación fue más amplio. La precipitación efectiva en la zona urbana tuvo un valor promedio de 82 mm a^{-1} , comparado con 574 mm a^{-1} en la zona de conservación para el periodo de 30 años.

Tabla 8. Series de tiempo promedio anual de T max, T min, T me, P, AE y Hrx para la zona urbana de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990

| Fecha | T max (°C) | T min (°C) | T me (°C) | P (mm/a) | AE (mm/a) | Hrx (mm/a) |
|-------|------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| 1961 | 24.0 | 8.8 | 16.4 | 561 | 379 | 40 |
| 1962 | 24.6 | 8.6 | 16.6 | 658 | 378 | 60 |
| 1963 | 23.7 | 8.4 | 16.1 | 815 | 435 | 128 |
| 1964 | 23.8 | 8.3 | 16.0 | 756 | 442 | 91 |
| 1965 | 23.6 | 8.0 | 15.8 | 894 | 417 | 186 |
| 1966 | 23.4 | 8.5 | 16.0 | 671 | 426 | 87 |
| 1967 | 23.8 | 8.4 | 16.1 | 827 | 458 | 159 |
| 1968 | 23.5 | 8.2 | 15.9 | 829 | 450 | 161 |
| 1969 | 24.7 | 8.9 | 16.8 | 595 | 402 | 97 |
| 1970 | 24.8 | 9.2 | 17.0 | 552 | 380 | 7 |
| 1971 | 24.5 | 9.4 | 16.9 | 615 | 408 | 25 |
| 1972 | 24.5 | 8.7 | 16.6 | 722 | 438 | 62 |
| 1973 | 24.5 | 8.4 | 16.5 | 884 | 426 | 297 |
| 1974 | 23.8 | 8.6 | 16.2 | 566 | 375 | 42 |
| 1975 | 24.2 | 9.9 | 17.1 | 681 | 419 | 13 |
| 1976 | 23.6 | 9.7 | 16.6 | 827 | 420 | 186 |
| 1977 | 24.4 | 10.1 | 17.3 | 616 | 386 | 22 |
| 1978 | 23.3 | 8.8 | 16.1 | 815 | 410 | 202 |
| 1979 | 23.6 | 8.2 | 15.9 | 801 | 406 | 213 |
| 1980 | 24.0 | 8.8 | 16.4 | 621 | 406 | 75 |

| | | | | | | |
|------|------|-----|------|-----|-----|-----|
| 1981 | 23.2 | 8.7 | 15.9 | 784 | 404 | 188 |
| 1982 | 24.9 | 8.8 | 16.9 | 627 | 392 | 67 |
| 1983 | 26.3 | 9.6 | 18.0 | 538 | 413 | 7 |
| 1984 | 25.4 | 9.6 | 17.5 | 526 | 376 | 40 |
| 1985 | 25.9 | 9.0 | 17.5 | 583 | 441 | 0 |
| 1986 | 26.0 | 9.1 | 17.6 | 517 | 406 | 2 |
| 1987 | 26.3 | 9.1 | 17.7 | 592 | 388 | 16 |
| 1988 | 26.3 | 9.1 | 17.7 | 568 | 423 | 0 |
| 1989 | 26.4 | 8.9 | 17.7 | 384 | 349 | 0 |
| 1990 | 25.9 | 9.1 | 17.5 | 618 | 446 | 0 |
| | 24.6 | 8.9 | 16.7 | 668 | 410 | 82 |

Temperatura máxima (T max), Temperatura mínima (T min), Temperatura media (T me), Precipitación (P), Evapotranspiración real (AE), Precipitación efectiva (Hrx).

Tabla 9. Series de tiempo promedio anual de T max, T min, T me, P, AE y Hrx para la zona de conservación de la ZMCM durante el periodo histórico 1961-1990

| Fecha | T max (°C) | T min (°C) | T me (°C) | P (mm/a) | AE (mm/a) | Hrx (mm/a) |
|-------|------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| 1961 | 18.8 | 4.9 | 11.8 | 1213 | 447 | 501 |
| 1962 | 19.3 | 4.7 | 12.0 | 802 | 364 | 174 |
| 1963 | 18.5 | 4.9 | 11.7 | 1350 | 522 | 583 |
| 1964 | 18.5 | 5.1 | 11.8 | 1242 | 513 | 446 |
| 1965 | 18.3 | 4.5 | 11.4 | 1352 | 484 | 556 |
| 1966 | 18.2 | 4.4 | 11.3 | 1175 | 461 | 366 |
| 1967 | 17.7 | 4.3 | 11.0 | 1535 | 511 | 656 |

| | | | | | | |
|------|------|-----|------|------|-----|------|
| 1968 | 17.5 | 3.7 | 10.6 | 1345 | 497 | 495 |
| 1969 | 18.6 | 4.2 | 11.4 | 1577 | 451 | 943 |
| 1970 | 17.9 | 3.8 | 10.9 | 1192 | 472 | 518 |
| 1971 | 17.8 | 3.6 | 10.7 | 1567 | 548 | 788 |
| 1972 | 17.4 | 4.5 | 11.0 | 1294 | 501 | 513 |
| 1973 | 17.8 | 4.6 | 11.2 | 1517 | 499 | 708 |
| 1974 | 17.3 | 3.7 | 10.5 | 1024 | 446 | 341 |
| 1975 | 17.7 | 4.7 | 11.2 | 1240 | 432 | 565 |
| 1976 | 16.9 | 4.3 | 10.6 | 1492 | 452 | 779 |
| 1977 | 16.9 | 4.3 | 10.6 | 1119 | 415 | 373 |
| 1978 | 16.8 | 4.9 | 10.8 | 1135 | 393 | 423 |
| 1979 | 17.1 | 4.3 | 10.7 | 1145 | 376 | 497 |
| 1980 | 15.3 | 4.1 | 9.7 | 1225 | 411 | 472 |
| 1981 | 14.5 | 3.9 | 9.2 | 1662 | 460 | 895 |
| 1982 | 16.9 | 4.5 | 10.7 | 1163 | 428 | 460 |
| 1983 | 16.9 | 4.7 | 10.8 | 1205 | 414 | 508 |
| 1984 | 17.6 | 5.6 | 11.6 | 1676 | 429 | 1024 |
| 1985 | 16.8 | 4.6 | 10.7 | 1386 | 394 | 675 |
| 1986 | 17.9 | 5.1 | 11.5 | 1314 | 426 | 652 |
| | 17.5 | 4.5 | 11.0 | 1306 | 452 | 574 |

Temperatura máxima (T max), Temperatura mínima (T min), Temperatura media (T me),
Precipitación (P), Evapotranspiración real (AE), Precipitación efectiva (Hrx)

5. Sistemas de abasto y drenaje de agua de la ZMCM: vulnerabilidad y resiliencia

Antes de analizar los impactos del cambio climático es fundamental considerar la vulnerabilidad y los riesgos actuales debidos a diversas prácticas en la gestión del agua de la ZMCM. La enorme demanda de más de 22 millones de habitantes y una larga historia de políticas insostenibles de manejo del recurso han provocado la sobreexplotación de los acuíferos, el escaso tratamiento de aguas residuales y tandeos en varias zonas, entre otros problemas. En esta sección se mencionan las áreas que representan las principales problemáticas de sustentabilidad, que generan un peligro latente de deterioro del servicio, ya que pueden poner en riesgo el acceso al agua aun sin considerar los impactos del cambio climático.

Los riesgos en la disponibilidad del vital líquido se derivan de la sobreexplotación de las fuentes locales y de la dependencia de fuentes externas. El problema de la insuficiencia financiera para hacer más eficiente el servicio, incluyendo el tema de las tarifas establecidas para el suministro de agua potable, resalta como una seria limitante para mejorar las condiciones. Finalmente, el sistema de drenaje de la ciudad y los riesgos relacionados con las inundaciones constituyen un asunto que se agrava cuando irrumpen los eventos de precipitaciones extremas.

Riesgos en la disponibilidad del agua

La ZMCM consume $61 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de agua; de ésta, 70% se extrae de fuentes locales, principalmente del acuífero, y el resto proviene de fuentes externas. Del total de agua, la Ciudad de México consume $32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y el Estado de México $29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Inegi, 2002; SACM, 2012) (véase tabla 10). Cerca de 44% del total del líquido suministrado en la capital del país se destina a uso doméstico; 21% para uso industrial, comercial y de servicios, mientras que 35% se pierde por fugas y uso clandestino (SACM, 2012). Descontando esa pérdida, el uso doméstico del recurso asciende a casi 68% del total de agua suministrada en la Ciudad de México, que equivale a $21.7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Las pérdidas por fugas son una preocupación y se deben en gran parte a la antigüedad de las redes de tuberías, su colapso en algunas partes de la urbe debido al hundimiento del terreno provocado por la propia sobreexplotación del acuífero y la mala calidad de los conductos en zonas periféricas (López-Quiroz *et al.*, 2009).

Tabla 10. Volumen disponible para la ZMCM

| Ciudad de México | | Estado de México | | Zona Metropolitana del Valle de México |
|----------------------|---|-------------------------|--|--|
| Fuentes internas | Fuentes externas | Fuentes internas | Fuentes externas | 61 m ³ |
| 20 m ³ /s | $\frac{12 \text{ m}^3/\text{s}}{32 \text{ m}^3/\text{s}}$ | 23 m ³ | $\frac{6 \text{ m}^3}{29 \text{ m}^3}$ | |
| Déficit | | | | |
| 3 m ³ /s | | 4.2-7 m ³ /s | | |

Fuente: Elaboración propia con datos de SACM, 2012.

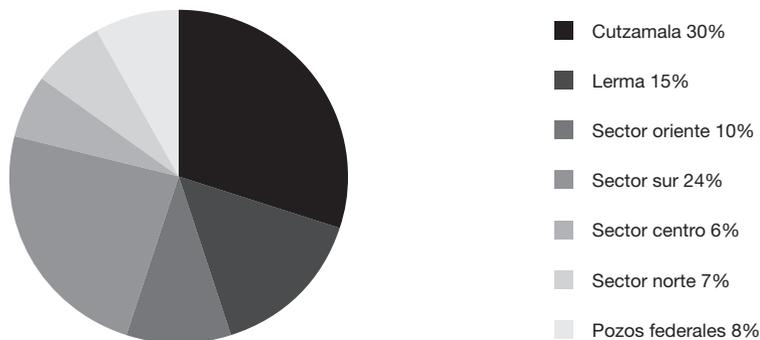
En la actualidad, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) recibe el líquido de fuentes locales y federales, estas últimas administradas por la Conagua. La cobertura de abasto de agua potable es de 99.5% en la Ciudad de México (Inegi, 2010). La capital consumió un total de

1 012 millones de metros cúbicos (Mm³) de agua en 2007, de los cuales 628 millones (62%) fueron de fuentes administradas por el gobierno de la ciudad y 384 millones (38%) por las autoridades federales, a través de la Conagua (véase tabla 11). Como se puede observar, la cantidad de agua que se entrega al gobierno de la Ciudad de México ha registrado una reducción ligera entre 1990 y 2007, a pesar de que la población y la actividad económica continúan creciendo.

Tabla 11. Volúmenes anuales de agua entregados de fuentes locales y federales

| Año | Fuentes locales | Fuentes federales | Gran total |
|------|-----------------|-------------------|---------------|
| 1990 | 604 200 384 | 449 756 906 | 1 053 957 290 |
| 1991 | 607 814 756 | 421 679 684 | 1 029 494 440 |
| 1992 | 631 173 796 | 411 014 270 | 1 042 188 066 |
| 1993 | 680 800 551 | 403 333 452 | 1 084 134 003 |
| 1994 | 685 232 611 | 452 593 567 | 1 137 826 178 |
| 1995 | 677 136 137 | 416 985 080 | 1 094 121 217 |
| 1996 | 685 358 235 | 410 443 386 | 1 095 801 621 |
| 1997 | 683 714 341 | 411 824 150 | 1 095 538 491 |
| 1998 | 668 701 558 | 404 081 506 | 1 072 783 064 |
| 1999 | 680 152 868 | 406 147 158 | 1 086 300 026 |
| 2000 | 701 000 677 | 392 366 352 | 1 093 367 029 |
| 2001 | 689 579 809 | 389 269 002 | 1 078 848 811 |
| 2002 | 672 993 910 | 387 628 374 | 1 060 622 284 |
| 2003 | 659 204 156 | 396 845 320 | 1 056 049 476 |
| 2004 | 643 416 790 | 390 712 352 | 1 034 129 142 |
| 2005 | 636 300 331 | 391 386 712 | 1 027 687 043 |
| 2006 | 624 391 199 | 383 317 213 | 1 007 708 412 |
| 2007 | 628 565 148 | 384 313 572 | 1 012 878 720 |

Fuente: SACM, 2008.

Figura 11. Volúmenes de agua por tipo de fuente

En términos de ubicación, en la figura 11 se muestran los volúmenes de agua que se extraen de diversas fuentes. Los mayores volúmenes ingresan por el sistema Cutzamala, alrededor de 311.81 Mm³ equivalentes a 27% del total del líquido que recibe la Ciudad de México. Le siguen en importancia las fuentes locales del sector sur, con cerca de 240 Mm³ (24% del total). En un nivel significativamente menor por su contribución de recurso se encuentra el sistema Lerma, con alrededor de 150 Mm³ (16% del total).³ Los sistemas que tienen una menor contribución porcentual son las fuentes locales del sector norte (8%), oriente y centro (7% cada uno) y de los pozos federales (11%). En términos de extracción dentro del territorio de la Ciudad de México, se registraron 522 pozos, con un volumen de 421 Mm³ anuales (Inegi, 2014).

La ubicación de las fuentes influye en la cantidad y la calidad de agua que se distribuye en las diferentes zonas de la Ciudad de México. La zona poniente por donde ingresa el sistema Cutzamala y la zona sur aparentemente serían las regiones con mayor acceso al recurso y menor vulnerabilidad derivada de la disponibilidad de agua; mientras que el centro,

³ Cabe mencionar que a partir de 1995 la Conagua transfirió a las autoridades locales la administración de varios pozos, lo cual se refleja en un aumento sustancial de las fuentes propias del sector sur y en la reducción de las fuentes de pozos federales en ese año.

el norte y el oriente de la ciudad cuentan con fuentes más limitadas. En este sentido, las características geográficas inherentes a la ubicación del recurso hacen más vulnerables a las colonias que se encuentran en el oriente, centro y norte de la capital, ya que están expuestas a la amenaza de fuentes relativamente escasas.⁴

Sin embargo, otra forma de evaluar estas cifras es el nivel de vulnerabilidad de la urbe en términos de la dependencia de fuentes externas, que representan 38% del total de agua consumida en la Ciudad de México. Bajo esa circunstancia, la falta de control de las autoridades locales respecto de las fuentes administradas por la Conagua puede hacer que cualquier suspensión temporal o permanente ponga en riesgo el acceso al recurso para una parte importante de la población, sobre todo la que habita en la zona poniente. De hecho, el sistema Cutzamala ya mostró sus primeras limitaciones al haber reducido su nivel de almacenamiento a 40% de su capacidad en 2009 (*Proceso*, 2009), cuando lo normal en época de estiaje es 70%, lo cual llevó a implementar recortes en el suministro en diversos momentos con la afectación de cerca de 400 colonias del poniente de la ciudad. Otro evento reciente mostró de nuevo la vulnerabilidad de la capital por la dependencia de fuentes externas: las reparaciones al sistema Cutzamala durante la última semana de octubre y la primera de noviembre de 2018, que generaron gran inquietud prácticamente en toda la ZMVM, pues se alertaba que 13 alcaldías y 13 municipios del Estado de México serían afectados. La escasa e imprecisa comunicación oficial propició que el tema se polemizara y que la población hiciera compras de pánico de sistemas de almacenamiento; las obras programadas para cinco días se extendieron a nueve, por lo que se suspendieron clases y actividades en diversos centros escolares y oficinas.

⁴ El abasto de agua se lleva a cabo a través de cinco sectores geográficos. El sistema norte incluye las alcaldías Azcapotzalco y Gustavo A. Madero; el sistema sur abarca Milpa Alta, Tlalpan, Xochimilco y una porción de Tláhuac, Coyoacán e Iztapalapa; el sistema poniente incluye Cuajimalpa, Magdalena Contreras, la mayor parte de Álvaro Obregón y parte de Miguel Hidalgo; el sistema oriente cubre la mayor parte de Iztapalapa, parte de Tláhuac y Venustiano Carranza; el sistema central incluye Benito Juárez, Cuauhtémoc, una porción de Coyoacán, Álvaro Obregón, Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza y Miguel Hidalgo (SACM-IMTA, 2006a).

Vulnerabilidad del acuífero

El tema de la sobreexplotación del acuífero ha sido mencionado en múltiples documentos, tanto oficiales como de investigación (Ortega-Guerrero *et al.*, 1993; Durazo, 1996; Sánchez y Gutiérrez, 1997; Warren y Rudolph, 1997; Birkle *et al.*, 1998; González *et al.*, 1999; Esteller y Díaz-Delgado, 2002). El DOF publicó en 2018 un estudio sobre la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos, en el que se concluyó que el perteneciente a la ZMCM registraba un nivel de sobreexplotación de 561 Mm³. Lo que representa una reducción de cerca de 64% del publicado en el *Diario Oficial de la Federación* (SACM-IMTA 2006a, p. 277). Se comenta que las discrepancias entre ambos estudios podrían deberse a errores en los volúmenes reportados en el Registro Público de Derechos de Agua (Repda). Información reciente muestra que el déficit es de 561.05 Mm³ a⁻¹ en 2015, lo que representa una sobreexplotación de 109% del total de las entradas al acuífero (DOF, 2018).

En términos de las consecuencias originadas por la sobreexplotación del acuífero, se menciona que la contaminación producida por el abatimiento acumulado en los niveles de agua subterránea ha ocasionado la salinización del recurso, debido a la inversión del flujo horizontal en algunas zonas del acuífero, particularmente en la región oriental de Iztapalapa y Texcoco. Además de la afectación directa, se advierte que la salinización del agua subterránea se puede propagar a otras zonas si las condiciones actuales se mantienen a largo plazo. La zona norte se encuentra en riesgo, sobre todo las alcaldías Gustavo A. Madero, Venustiano Carranza e Iztacalco, por ser las más cercanas (SACM-IMTA, 2006a). Lo anterior significa que el abasto de la ciudad es altamente vulnerable no sólo en términos de cantidad sino también de calidad. En principio esto reduciría el volumen del líquido, a menos que sea tratado de manera previa con el consecuente costo, aunque en la práctica en algunas colonias el agua se ha distribuido sin tratamiento previo, como se explicará más adelante.

El problema trasciende la dimensión local, pues a escala regional el acuífero de la Ciudad de México se relaciona con los acuíferos de Cuauhtlán-Pachuca, Texcoco y Chalco-Amecameca, que en su conjunto forman un sistema con una sobreexplotación generalizada (véase tabla 12). A la sobreexplotación de 561.05 Mm³a⁻¹ se suma la de 106 Mm³a⁻¹ del acuí-

fero de Cuautitlán-Pachuca, de 111.86 Mm³a⁻¹ del acuífero de Texcoco y la de 22.92 Mm³a⁻¹ de Texcoco (DOF, 2018).

Tabla 12. Indicadores para los acuíferos de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco-Amecameca, Mm³a⁻¹

| Indicador | Acuífero de la Ciudad de México | Cuautitlán-Pachuca | Texcoco | Chalco-Amecameca |
|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------|------------------|
| Recarga total media anual | 512.8 | 356.7 | 145.1 | 79.3 |
| Volumen de extracción y concesionado | 1 073.8 | 462.7 | 256.9 | 102.2 |
| Disponibilidad media anual (déficit) | -561.05 | -106.04 | -111.86 | -22.92 |

Fuente: DOF, 2018.

El hecho de que los acuíferos del Estado de México presenten niveles altos de sobreexplotación, particularmente el de Cuautitlán-Pachuca y Texcoco, aumenta el riesgo de competencia del recurso proveniente de fuentes federales. A esto se debe sumar el crecimiento acelerado de la población de la entidad mexiquense y de Hidalgo, donde algunos municipios conurbados registraron tasas de 59 a 13.1% entre 2005 y 2010 (Inegi, 2014). En conjunto, existe un riesgo alto derivado de la sobreexplotación del acuífero, la alta dependencia de fuentes externas y el continuo crecimiento de la mancha urbana que reducen el nivel de resiliencia de la ciudad frente a otro tipo de impactos tanto sociales como naturales.

La sobreexplotación es un problema que continúa. En la actualidad los pozos se perforan de 300 a 450 m, mientras que en los años setenta se perforaban a 100 o 150 m de profundidad. Cabe hacer notar que, a medida que se va profundizando el nivel de bombeo, se encuentran formaciones geológicas que muchas veces tienen un impacto negativo sobre la calidad del agua. Hasta el momento no hay indicios de que las autoridades

pretendan reducir el nivel de extracción del acuífero (SACM, 2012a). Por el contrario, recientemente se hicieron obras para extraer agua a profundidades mayores de 2 000 m. El presidente de la República anunció a finales de 2017 que estos pozos marcaban una nueva etapa en la historia hídrica del país. Aunque esto en principio genera una nueva fuente de agua para la ciudad, indica la falta de sustentabilidad de los proyectos de extracción del vital líquido, pues son recursos no renovables que una vez utilizados dejan de estar disponibles para futuras generaciones.

Los costos de ese hundimiento por sobreexplotación del acuífero no se han cuantificado, pero incluyen la construcción del drenaje profundo, los sistemas de bombeo del drenaje y el deterioro de todo tipo de infraestructura pública y privada. Algunos especialistas han mencionado que sin el hundimiento no se hubiera necesitado el drenaje profundo y tampoco el bombeo sistemático que se está haciendo en el Gran Canal del Desagüe. Las afectaciones van más allá, pues repercuten en las reparaciones de las líneas del Metro debido a los hundimientos y a las malas condiciones de muchas vialidades o de las cimentaciones de los edificios. Por este motivo, en múltiples ocasiones se ha recomendado reducir la extracción y recargar los mantos freáticos con agua residual potabilizada y con agua de lluvia, como lo hacen otros países (SACM, 2012a).

Sectores vulnerables de la población

La vulnerabilidad designa la combinación de factores sociales, económicos y ambientales que determinan hasta qué punto la vida y los medios de subsistencia de alguien están expuestos a pérdidas o daños debido a una amenaza concreta (WB, 2008, p. 279). En la Ciudad de México se tienen registradas 260 colonias que sufren tandeos o recortes del servicio (GDF, 2014) y que muestran mayor vulnerabilidad por su acceso irregular al servicio de abasto de agua. Según un estudio desagregado de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT), estos tandeos afectan al menos a 1 430 667 personas, mientras que 87 324 reciben además agua de mala calidad (Soto, 2008). Como se muestra en la tabla 13, los tandeos más numerosos se encuentran en Iztapalapa, Tlalpan, Coyoacán y Magdalena Contreras, pero son varias las alcaldías que

presentan problemas. Los tandeos cambian de intensidad, pues mientras en Álvaro Obregón se recibe agua en promedio 63 horas a la semana, en Tlalpan lo hace 35 horas en promedio, en Iztapalapa 20 horas en promedio y en Tláhuac y Milpa Alta sólo 14 horas a la semana. La población más pobre es más propensa a obtener una distribución desigual del líquido, ya que alrededor de 60% de las personas que habitan en estas colonias tienen ingresos menores a dos salarios mínimos mensuales (Soto, 2008). Resulta irónico que los habitantes con problemas de escasez de agua sean justo los que habitan en zonas donde se recarga el acuífero y, por tanto, existe mayor disponibilidad natural del recurso.

Tabla 13. Colonias afectadas por tandeos en la Ciudad de México

| Alcaldía | Total de colonias que presentan tandeos | Población total en las colonia afectadas por tandeos | Porcentaje de población que recibe menos de dos salarios mínimos |
|---------------------|---|--|--|
| Álvaro Obregón | 11 | 70 579 | 55 |
| Coyoacán | 6 | 172 023 | 52 |
| Cuajimalpa | 16 | 50 437 | 54 |
| Gustavo A. Madero | 10 | 61 987 | 60 |
| Magdalena Contreras | 29 | 132 532 | 55 |
| Iztapalapa | 59 | 585 564 | 63 |
| Milpa Alta | 7 | 26 817 | 63 |
| Tlalpan | 82 | 275 591 | 52 |
| Xochimilco | 21 | 54 157 | 59 |
| Totales | 241 | 1 430 687 | 58 |

El número de colonias que no están registradas por el Inegi son: con una colonia Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero y Milpa Alta; Magdalena Contreras con dos colonias, Xochimilco con cinco, Iztapalapa con 18 y Tlalpan con 30.

Según datos oficiales, varias colonias en la alcaldía de Iztapalapa, además de tandeos, sufren problemas de calidad del agua: exceso de fierro y manganeso, por lo que el líquido presenta tonalidades amarillas y a veces con olor desagradable. Las colonias que se identificaron son: Citlali, Ixtlahuacan, Lomas de la Estancia, Lomas de Zaragoza, La Polvorilla, Ampliación Emiliano Zapata, Campestre Potrero, Huitzico, La Cañada, La Poblánita y Las Cruces (Soto, 2008).

Los hogares que sufren tandeos o reciben líquido de mala calidad enfrentan costos tanto monetarios como de tiempo. Tienen que recurrir a prácticas de almacenamiento, buscar otras fuentes de abastecimiento de agua —incluyendo la compra de agua de pipa—, adquirir agua embotellada y, en ocasiones, acarrearla. En un estudio a escala nacional, Conagua estima que el precio del agua de pipa provisto por un particular es de 82 pesos por m^3 y 20 pesos por m^3 si es llevada por un organismo público debido al pago de propinas. Mientras que el acarreo representa un costo monetario de 442 pesos por m^3 considerando el valor social del tiempo. Si se compara el precio del m^3 de agua de pipa, que está entre 20 y 82 pesos, según sea provista por un organismo público o por un vendedor privado, contra los 4.9 pesos que pagan los hogares que reciben subsidios altos, el diferencial denota una clara inequidad social (CIDE-Conagua, 2012).

Por otro lado, la compra de agua embotellada es una medida de protección que puede afectar desproporcionadamente a los hogares de bajos ingresos. México es el primer consumidor de agua embotellada en el mundo, lo cual puede estar relacionado con aspectos como el crecimiento de esta industria en el país, con la débil capacidad institucional de los organismos operadores de agua, pero también con la percepción de la población sobre la confiabilidad de la calidad del líquido. Los resultados de una encuesta en la Ciudad de México arrojaron que, en Iztapalapa, una de las alcaldías con menor nivel de ingreso de la capital y con problemas severos de tandeos y calidad del líquido, 91% de los hogares consume agua embotellada frente a 61% de los hogares de las alcaldías del poniente que registran mayores ingresos y mejores condiciones del servicio (Soto, 2007).

Sistema tarifario: equidad, eficiencia y financiamiento

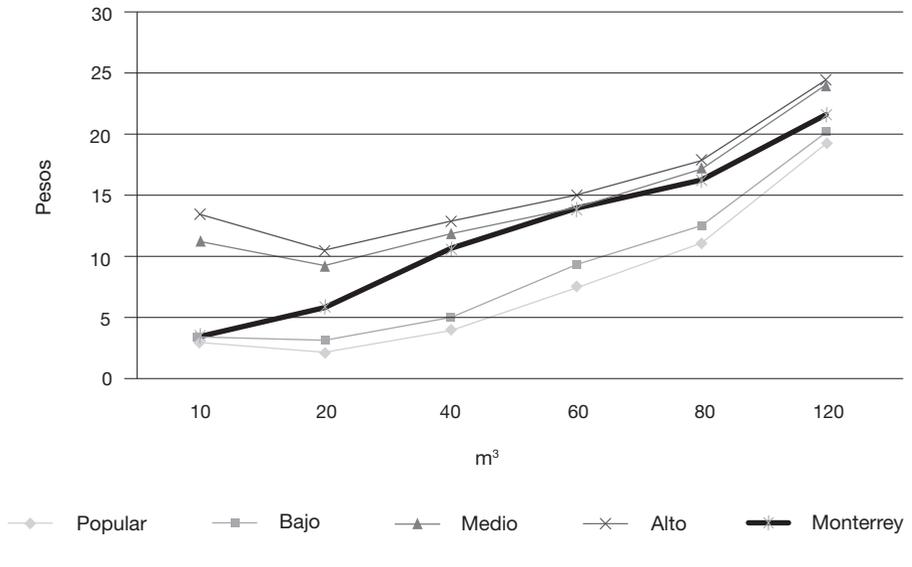
En la Ciudad de México sólo 62% de los usuarios cuenta con servicio de agua medido (1.3 millones), 17% paga tarifas fijas, mientras que el resto está exento de pago (SACM, 2012). La capital del país tenía un esquema de subsidios generalizados hacia el sector doméstico, donde casi la tercera parte de los hogares pagaba menos de 20 pesos bimestrales y la mayoría (91%) menos de 200 pesos bimestrales por el servicio hasta antes de 2010 (Soto, 2007). Frente la creciente escasez, la Asamblea Legislativa, en coordinación con el Sistema de Aguas de la Ciudad de México y la Tesorería, llevó a cabo una reestructuración de tarifas que entró en vigor en 2010, con los objetivos de aumentar la recaudación del sector e inhibir el sobreconsumo derivado de los precios bajos.

La reestructuración se diseñó diferenciando subsidios en función del índice de desarrollo por manzana, al tomar en cuenta el ingreso de los hogares y los valores catastrales de las viviendas. Con este criterio se catalogó a las manzanas en cuatro clasificaciones: popular, bajo, medio y alto. Según las autoridades, el costo real por m^3 es de 26 pesos, pero cada tipo de manzana obtiene un subsidio diferente.

Este ajuste en el sistema tarifario significa que los hogares que tienen servicio medido pagan cantidades diferentes por el mismo volumen de agua. Considerando estándares internacionales, en promedio una persona consume 150 litros diarios, de manera que un hogar de cuatro a cinco miembros consumiría entre 36 y 40 m^3 bimestrales. Usando el caso de un consumo bimestral de 40 m^3 , una vivienda clasificada en el nivel popular paga 196 pesos en ese periodo, en la de nivel bajo, 293; en la de nivel medio, 620, y en la clasificación de nivel alto paga 679. El costo real de los 40 m^3 sin subsidio sería de 1 040 pesos (Soto, 2015).

En la figura 12 aparece el precio del m^3 de agua para las cuatro clasificaciones de hogares y, como comparativo, se presenta el precio en la ciudad de Monterrey, que se caracteriza por tener uno de los sistemas más confiables de provisión del servicio del país, con un suministro continuo y una cobertura total de tratamiento de aguas residuales. Se puede observar que sólo los hogares clasificados en niveles medio y alto pagan cuotas parecidas a las de Monterrey.

Figura 12. Precios del agua para uso doméstico en la Ciudad de México y Monterrey (pesos por m³)



* Incluye 25% por drenaje

A escala nacional, el pago por el servicio para los usuarios conectados a la red pública representa en promedio 2.1% de sus ingresos. Los estándares internacionales recomiendan pagar entre 3 y 5% del ingreso familiar en los hogares de bajos recursos, y en los grupos con mayores percepciones la sugerencia es cobrar el costo total del servicio. Es decir, en México los cobros por el servicio del agua aún están por debajo de la recomendación internacional. Como se mencionó antes, es bien sabido que el efecto adverso de tarifas bajas consiste en inducir sobreconsumos por la falta de incentivos económicos para hacer uso eficiente del suministro.

Además, las autoridades de la Ciudad de México informaron que 75% de las cuentas en la capital quedan en categoría popular y baja: 650 000 en popular y más de 520 000 en baja. Esta clasificación sobrestima el número de manzanas en el nivel popular y bajo, pues cifras del Consejo de Evaluación Social de la Ciudad de México indican que sólo

50% de las manzanas entraría en un grado de desarrollo social muy bajo y bajo (26.7% muy bajo y 23.3% bajo); mientras que el otro 50% tiene un grado de desarrollo medio y alto (20% medio y 29.9% alto). Esto significa que 25% de las manzanas recibe un subsidio que no corresponde con su nivel de ingreso. Por tal motivo es importante reclasificar las manzanas y, con ello, aumentar la capacidad financiera para mejorar la eficiencia del servicio (Soto, 2015).

Con lo anterior se pretende mostrar que la revisión de tarifas es un mecanismo que puede mejorar la recaudación y, por consiguiente, la capacidad de las autoridades para llevar a cabo las inversiones requeridas, con el fin de dar mantenimiento y mejorar el sistema de abasto, enviar las señales correctas a los consumidores sobre la escasez del recurso y, paralelamente, contar con elementos para abordar problemas de equidad social en el cobro y en la distribución del servicio. El diseño de tarifas con criterios económicos, sociales y de sustentabilidad podría convertirse en un instrumento que permita a las autoridades financiar las políticas necesarias para aumentar la resiliencia de la ciudad en torno al manejo del agua.

El sistema de drenaje y las inundaciones

Prácticamente todos los ríos naturales de la región que fluían hacia los lagos centrales de la cuenca ahora están conectados a un sistema de desagüe. La ciudad cuenta con una compleja red de drenaje que se fue construyendo desde la época de la Conquista, pero que se ha redimensionado con el tiempo. En 1975 los cambios en la pendiente del terreno derivados de la sobreexplotación del acuífero hicieron necesario construir el drenaje profundo, llamado Gran Canal, con una profundidad de 48 a 217 m, un diámetro de 6.5 m y una longitud de 153 km, a causa de la imposibilidad de continuar desalojando las aguas negras por gravedad. De nuevo, debido al hundimiento fue indispensable instalar dos plantas de bombeo de aguas negras en el Gran Canal en 2002, con una capacidad de $40 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, para evitar el riesgo de inundaciones mayores. Ésta fue la inversión más cuantiosa de la primera década del presente siglo desde la construcción del Gran Canal en 1975, de alrededor de 300 millones de pesos (*Reforma,*

2002; SACM, 2012a). Estas plantas de bombeo se construyeron también debido a los hundimientos diferenciales de la ciudad generados por la sobreexplotación del acuífero.

La operación y la seguridad del drenaje se convirtió otra vez en una preocupación importante durante la década pasada, cuando el riesgo de grandes inundaciones en la ciudad aumentó debido al hundimiento del terreno y a un déficit de desalojo que según las autoridades podía alcanza $12.9 \text{ Mm}^3\text{d}^{-1}$. Uno de los proyectos para atender este problema incluye un canal de drenaje adicional llamado Túnel Emisor Oriente, con un costo estimado de 46 263 millones de pesos, con capacidad de $150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, diámetro de 7 m, longitud de 62 km y una profundidad que varía de 30 a 150 m (Conagua, 2018). El segundo proyecto es una megaplanta de tratamiento nombrada Atotonilco, con una capacidad de tratamiento de 60% de las aguas residuales producidas en la ZMCM, cuyo caudal está destinado principalmente para uso agrícola. Ambos proyectos se iniciaron en 2008 y se esperaba concluirlos en 2012, pero se terminaron en enero de 2020. La obra del Túnel Emisor Oriente reduce el riesgo de una inundación de grandes proporciones, pero no disminuye la ocurrencia de inundaciones producidas de manera local por eventos extremos, pues las inversiones en el sistema de drenaje secundario u otras acciones para prevenirlas no han recibido la misma atención.

En el ámbito de la protección civil, la Unidad Tormenta fue creada en 2007 para coordinar los esfuerzos de los organismos y las instituciones de los gobiernos de la Ciudad de México y el Estado de México, y de las autoridades federales, para hacer frente a las situaciones de emergencia relacionadas con las inundaciones. La Unidad Tormenta está diseñada para permitir una respuesta rápida a las inundaciones causadas por las fuertes lluvias. Como parte de sus estrategias de prevención, las tres instancias también acordaron un protocolo para operar el sistema de drenaje en caso de contingencias (SACM, 2012a).

A manera de balance, el análisis agregado de la información antes mencionada permite distinguir las diversas áreas de riesgo:

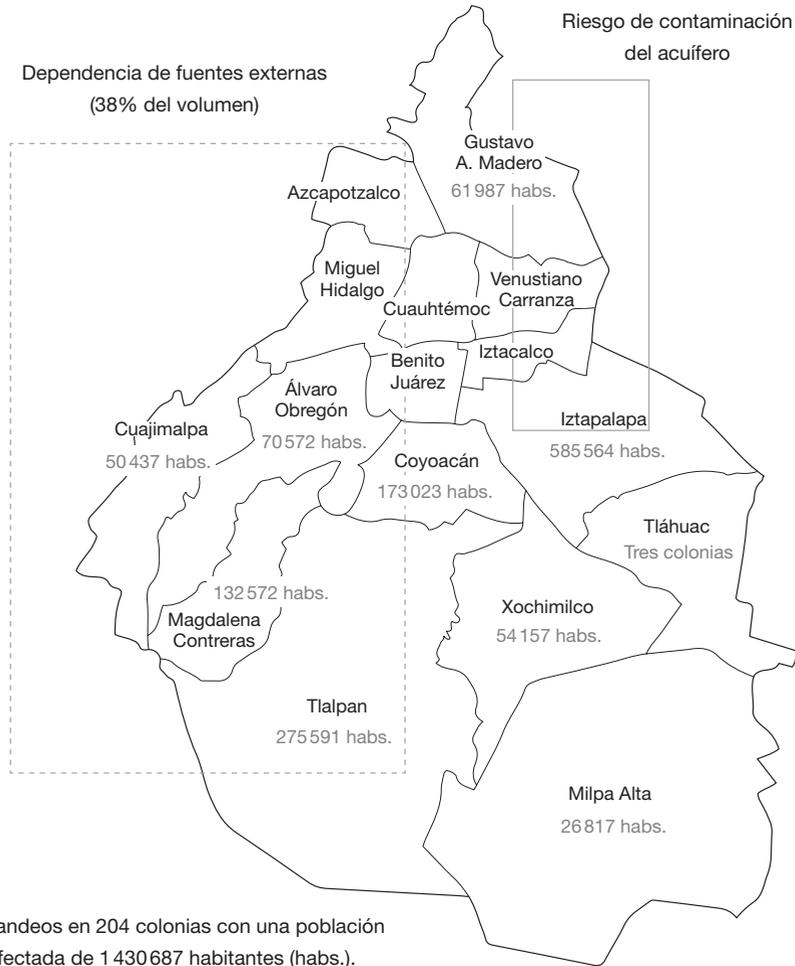
- En la actualidad, 240 colonias son vulnerables al recorte del servicio de agua; en ellas habitan cerca de 1.5 millones de personas.

- Cuatro alcaldías del oriente se encuentran en riesgo de deterioro de la calidad del agua por las prácticas insostenibles de explotación del acuífero.
- El 38% de los habitantes de las alcaldías del poniente es vulnerable por la dependencia de fuentes externas (véase figura 13).
- Un sistema de drenaje que reduce el riesgo de inundaciones mayores, pero con un desagüe secundario que aún necesita revisarse para evitar inundaciones localizadas.

Según un estudio agregado para la ZMCM, es previsible un déficit de agua de $25.1 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el año 2030, considerando las tendencias de crecimiento de la población y la ineficiencia del manejo de los organismos operadores de agua, tanto del Sacmex como de los municipales en el Estado de México. Sin embargo, si se toma en cuenta la sobreexplotación, la proyección podría llegar a $46.2 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (WB, 2013). No está claro cómo este déficit podría afectar a la Ciudad de México en comparación con el Estado de México, debido a su dependencia de fuentes externas y a las capacidades institucionales diferenciadas.

Toda esta información confirma el bajo nivel de resiliencia de la urbe frente a eventos externos, en particular ante los riesgos derivados del cambio climático. Cabe mencionar que los sectores más vulnerables están compuestos de manera predominante por hogares de bajos ingresos —muchos de ellos enfrentan problemas con la calidad del servicio—, así como por los que poseen una limitada capacidad de enfrentar problemas relacionados con las inundaciones y que pueden ver en riesgo su prosperidad actual y futura.

Figura 13. Áreas de riesgo en la ZCM



6. Los impactos del cambio climático en el balance hídrico de la ZMCM

Las proyecciones en el aumento de la temperatura debido a las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero señalan impactos importantes en los recursos hídricos a escala mundial (IPCC, 2013). En particular, la variación en la intensidad y la magnitud de precipitaciones extremas y sequías ha sido identificada como uno de los principales retos para la gestión del agua durante el presente siglo. El objetivo de este capítulo es investigar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de la ZMCM. Para este fin se utiliza una metodología que parte de datos de precipitación y temperatura derivados de la selección de escenarios climáticos determinados por la combinación de un escenario de emisiones, un modelo acoplado atmósfera-océano y una técnica de escalamiento regional. Las proyecciones de temperatura y precipitación se emplean como entradas en un modelo hidrológico que considera la capacidad de regulación de humedad del suelo para calcular el balance de agua que permite estimar las disponibilidades del líquido en el periodo futuro. El grado de impacto del cambio climático resulta de la comparación de cada proyección con los valores medios obtenidos durante el periodo de referencia 1961-1990. El análisis se presenta en términos porcentuales de cambio de las variables hidrológicas en el periodo seleccionado del siglo XXI respecto de las correspondientes del periodo de control del siglo XX. Las proyecciones presentadas incluyen dos escenarios climáticos de emisión que incorporan dos tendencias socioeconómicas futuras: el B1 y el A1B. El

escenario B1 supone un aumento moderado en la temperatura global del planeta, mientras que el A1B presupone un futuro más pesimista y, consecuentemente, debería implicar un mayor impacto en el ciclo hidrológico.

Escenarios de emisiones de GEI

Un factor fundamental en el proceso de estimación de los efectos del cambio climático es construir escenarios de emisiones futuras de GEI. Los escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero utilizados en esta sección son los planteados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático en su Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE) 2001, también conocido como SRES, por sus siglas en inglés (IPCC, 2001). Estos escenarios presentan las emisiones futuras basados en diversas proyecciones de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica de la población mundial. Los escenarios IEEE están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2), las cuales exploran vías de desarrollo alternativas. La familia A1 presupone un desarrollo económico mundial muy rápido, un crecimiento de la población global máximo alcanzado a mediados del siglo XXI y una introducción rápida de tecnologías nuevas y más eficientes. Esta familia se divide en tres grupos, que reflejan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1F1), energías de origen no fósil (A1T) y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B). La familia B1 describe un mundo convergente, con la misma población que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información. La B2 describe un planeta con una densidad demográfica intermedia y un crecimiento económico intermedio más orientado a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y ambiental. La familia A2 describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento poblacional fuerte, así como con desarrollo económico y cambio tecnológico lentos. Es decir, las emisiones de GEI dependerán del tipo de desarrollo que tenga el planeta y de la tecnología que se desarrolle para lograrlo, la cual conducirá a mayores o menores aumentos en la temperatura global.

En el marco de la quinta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (CMP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáti-

cas (WCRP, por sus siglas en inglés), se definieron cuatro escenarios nuevos de emisión denominados “trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés)”. Estas trayectorias se caracterizan por su forzamiento radiativo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 Wm^{-2} (véase tabla 14). Se debe considerar que el clima terrestre permanece estable en gran medida porque la cantidad de energía que recibe la Tierra es equivalente a la que desprende (el balance energético está equilibrado). Sin embargo, hay factores que han provocado cambios notables en el sistema climático. Como estos factores impulsan o *fuerzan* la modificación del sistema, se denominan “forzamientos”. El FR permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocadas por estos impulsores (IPCC, 2013).

Las trayectorias de concentración representativas comprenden dos escenarios de estabilización (RCP 4.5 y RCP P6.0): un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento radiativo muy bajo (RCP 2.6) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI (RCP 8.5) (véase tabla 14). A diferencia de los escenarios de emisión utilizados en el *Cuarto informe de evaluación* (IPCC, 2007) estos escenarios contemplaban los efectos de las posibles políticas aplicadas para mitigar las emisiones de GEI.

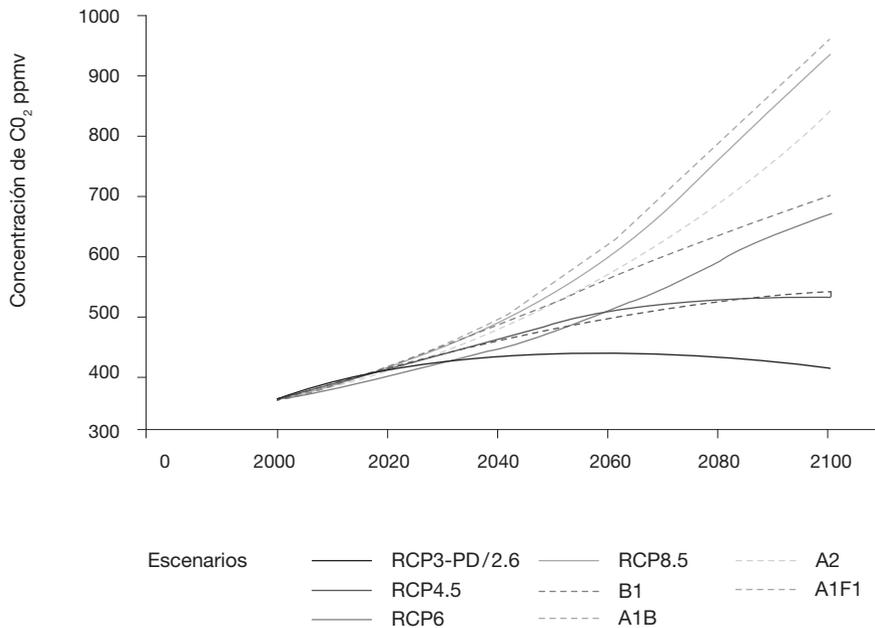
Tabla 14. Las cuatro trayectorias de concentración representativas

| Escenario | FR W/m^2 | CO_2 ppm |
|-----------|-------------------|-------------------|
| RCP 2.6 | 2.6 | 421 |
| RCP 4.5 | 4.5 | 538 |
| RCP 6.0 | 6.0 | 670 |
| RCP 8.5 | 8.5 | 936 |

Trayectoria de concentración representativa (RCP); forzamiento radiativo (FR); partes por millón de bióxido de carbono (CO_2 ppm). Como se puede observar, el nombre del escenario hace referencia al forzamiento radiativo medido en *watts* por m^2 .

Las proyecciones climáticas empleadas en este informe se basan en los modelos del CMIP3 para los escenarios IEEE, ya que fueron las que mejor simulaban las condiciones históricas de la Ciudad de México. Además, han resultado consistentes en gran medida con los modelos CMIP5 para los escenarios RCP. Por ejemplo, el escenario B1 predice concentraciones de CO₂ similares a las que arroja el RCP4.5 (véase figura 14).

Figura 14. Comparación de las concentraciones de CO₂ proyectadas para los escenarios RCP3-PD/2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5, B1, A1B, A2 y A1F1.



Con frecuencia se asume que modelos más complejos y actualizados funcionarán mejor y/o producirán proyecciones más robustas que la generación anterior de escenarios o modelos. Sin embargo, un gran número de investigaciones ha comparado las simulaciones realizadas entre CMIP3 y CMIP5 y han concluido que, aunque la resolución espacial

del segundo ha mostrado avance en relación con el primero, la mejora general es insignificante, pues mayor complejidad no implica necesariamente mejor eficacia (Knutti y Sedláček, 2013; Kumar *et al.*, 2014; Sheffield *et al.*, 2014; Lauer y Hamilton, 2013). Por otro lado, aun cuando la resolución de los modelos globales ha aumentado de manera significativa, muchos estudios encuentran poca o ninguna diferencia sustancial en los patrones a gran escala de cambios en la temperatura media y eventos de precipitación extrema producidos por CMIP3 y CMIP5 (Knutti y Sedláček, 2013; Sheffield *et al.*, 2014; Kharin *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2015) (véase tabla 15). De manera adicional, se optó por emplear una técnica de escalamiento que ha proporcionado proyecciones más robustas para cuantificar los cambios y los impactos climáticos a escala local (Sanderson, 2015; Kotamarthi, 2016; Thrasher, 2013; Knutti, 2017; Nahar *et al.*, 2017).

Tabla 15. Proyecciones del intervalo probable de cambio de temperatura media global del aire en la superficie para finales del siglo XXI de acuerdo con el cuarto y quinto informes de evaluación del IPCC

| Escenario 4 IPCC | Cambio de T (°C) | Escenario 5 IPCC | Cambio de T (°C) |
|------------------|------------------|------------------|------------------|
| B1 | 1.2-2.9 | RCP 2.6 | 0.3-1.7 |
| A1B | 1.7-4.4 | RCP 4.5 | 1.1-2.6 |
| A2 | 2.0-5.4 | RCP 6.0 | 1.4-3.1 |
| A1F1 | 2.4-6.4 | RCP 8.5 | 2.6-4.8 |

Las dos columnas de la izquierda presentan cuatro escenarios con sus respectivos valores de temperatura probables incluidos en el cuarto informe del IPCC, mientras que las dos columnas de la derecha muestran los escenarios ajustados con políticas de mitigación reportados en el quinto informe del IPCC, con sus correspondientes valores de temperatura probables.

Modelos de circulación global

El siguiente paso para analizar los impactos del calentamiento global es traducir las concentraciones del gas de efecto invernadero en términos de cambio climático. Actualmente, una de las principales herramientas de la ciencia moderna para generar futuros escenarios de dicha variación del estado del clima son los modelos de circulación global (Zhang, 2011; Reshmidevi *et al.*, 2018). Los MCGs son modelos matemáticos tridimensionales del sistema climático que calculan las ecuaciones físicas que describen el movimiento de energía y agua del planeta. Los MCGs vinculan las interacciones de los procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre. Hoy en día los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (MCGAAO) ofrecen la más completa representación del sistema climático. Los MCGAAOs se actualizan y mejoran continuamente en diferentes centros de investigación del mundo. Por ejemplo, en el Reino Unido el Centro Hadley simula el cambio climático permitiendo la interacción dinámica y la retroalimentación entre la atmósfera y los océanos mediante el Hadley Centre Coupled Model, versión 3 (HadCM3) (Turner *et al.*, 2006). En Canadá, el Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis ha desarrollado varios modelos de simulación para la predicción del clima y el mejor entendimiento de los procesos que gobiernan el sistema climático; su modelo acoplado de clima (CGCM3) pertenece a la tercera generación de modelos que integran los más recientes componentes de la atmósfera y el océano (Chun *et al.*, 2014). En Estados Unidos, The National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) y el Geophysical Fluid Dynamics Laboratory han trabajado juntos durante los últimos 20 años desarrollando diferentes AOGCMS (Leonard *et al.*, 2017).

La información producida por los cerca de 36 AOGCMS a escala global es reunida por el Programa Mundial de Investigación Climática. El grupo de trabajo del WCRP fomenta el desarrollo y la revisión de modelos climáticos acoplados y organiza proyectos de comparación entre los mismos con el objetivo de comprender mejor los cambios climáticos pasados, presentes y futuros que surgen de la variabilidad natural y antropogénica en un contexto multimodelo. Este entendimiento incluye evaluaciones del

desempeño del modelo durante el periodo histórico y cuantificaciones de las causas de la propagación en las proyecciones futuras en tiempo y en espacio. Los datos comparativos arrojados están disponibles en modelos estándares para que otros científicos los utilicen y se les facilite reconocer las causas de las diferencias en los resultados que se obtienen de estos modelos (McSweeney y Jones, 2016).

Los AOMCGS predicen con gran confiabilidad el aumento de la temperatura media anual del planeta; sin embargo, también incrementan la incertidumbre sobre la medida en que serán afectada las variables climáticas locales —como precipitación, humedad, radiación solar, etcétera— (Woldemeskel *et al.*, 2014; Nahar *et al.*, 2017). Dado que la resolución de los modelos de circulación global es demasiado gruesa, del orden de 2.5° latitud \times 3.75° longitud, los estudios de investigación sobre los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos han utilizado diferentes técnicas para integrar modelos hidrológicos con los resultados de modelos de circulación global. Por ejemplo, Hughes (2003) y Loáiciga (2003) emplearon modelos regionales de circulación (MRCs) con una resolución del orden de 50×50 km. Herrera Pantoja y Hiscock (2015) usaron factores de escalamiento en siete AOGCMS para proyectar los impactos del cambio climático en la disponibilidad del agua en una región semiárida del norte de México. Shen *et al.* (2018) estudiaron la incertidumbre de 20 MCGS para reproducir los regímenes hidrológicos de la cuenca del Río Hanjiang en China, con un método de corrección de sesgo.

Impactos en el balance hídrico de la ZMCM

Para investigar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de la ZMCM se realizaron los cálculos de evapotranspiración potencial por el método Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1982) y de evapotranspiración real y precipitación efectiva por medio de la versión modificada del balance de humedad del suelo (Herrera-Pantoja y Hiscock, 2008). Para ambos cálculos se utilizaron las series de tiempo del modelo de clima de laboratorio de dinámica de fluidos geofísicos versión 2.5 GFDL2, para los escenarios de emisiones B1 y A1B, en los cuales las concentraciones de emisiones de GEI mundiales alcanzan niveles de 550 y 720 ppm, respecti-

vamente, y en relación con diferentes supuestos (véase tabla 16). Como ya se explicó, las bases de datos se obtuvieron del Coupled Model Intercomparison Project Phase 3 (CMIP3) multi-model dataset del WCRP; puede consultarse en <http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/about_ipcc.php>.

Tabla 16. Características demográficas, sociales, económicas y tecnológicas de los escenarios A1B y B1

| Característica | Escenario | |
|-----------------------------|-----------|----------|
| | A1B | B1 |
| Crecimiento de la población | Bajo | Bajo |
| PIB | Muy alto | Alto |
| Uso de energía | Muy alto | Bajo |
| Cambio en el uso del suelo | Lento | Rápido |
| Uso de recursos | Moderado | Lento |
| Cambio tecnológico | Rápido | Moderado |

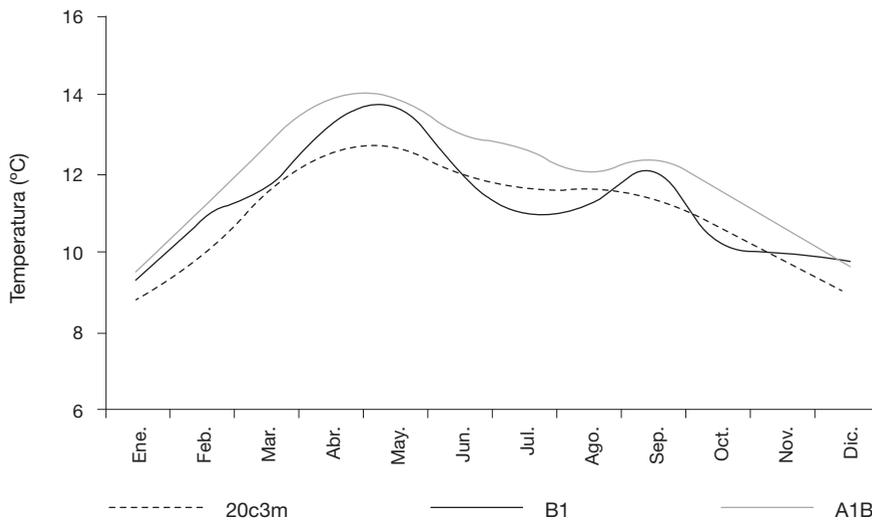
Fuente: IPCC, 2007.

La elección del modelo GFDLCM2 se basó en el análisis de las salidas de los modelos que mejor simulaban las condiciones históricas para la Ciudad de México. Se seleccionaron las series de tiempo de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación para el periodo 1959-1988 con datos diarios, lo cual es importante para evitar subestimación en los cálculos de precipitación efectiva (Howard y Lloyd, 1979). El desarrollo de factores de escalamiento se llevó a cabo de acuerdo con la metodología utilizada por Yusoff *et al.* (2002) y los factores fueron aplicados a la línea base y a las series de tiempo futuro 2046-2085 para ajustarlas.

Las simulaciones para la ZMCM prevén cambios estacionales para el escenario B1 con un decremento de la temperatura durante la época de lluvias y un incremento durante el verano y la temporada invernal, mientras que para el escenario A1B el aumento de la temperatura es generalizado a lo largo del año (véase figura 15). De hecho, la anomalía

o cambio respecto de la línea base de temperatura para el escenario A1B simula una elevación de aproximadamente 2 °C, con un marcado crecimiento de la anomalía o cambio a partir del segundo periodo de 20 años representado, es decir, a partir del año 2067.

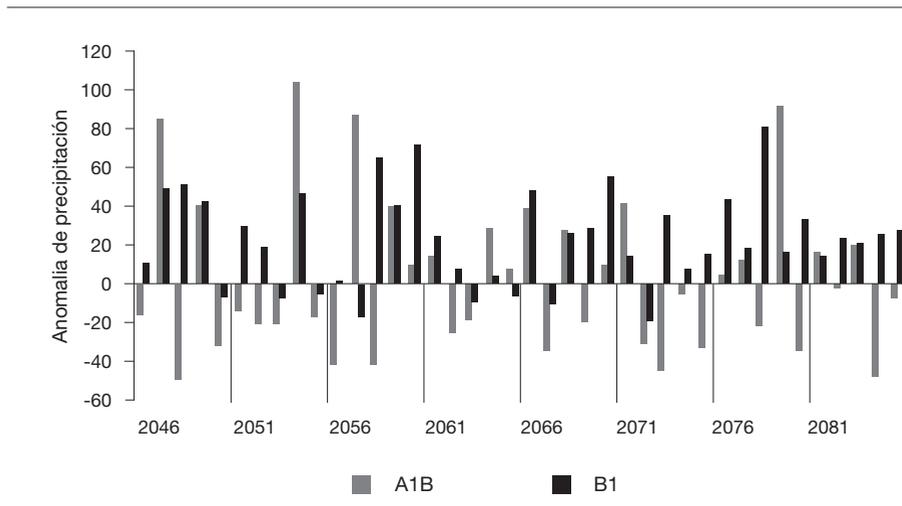
Figura 15. Temperatura promedio mensual (°C) del periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones A1B y B1, comparado con la línea base (20c3m), de acuerdo con el modelo GFDLCM2



En términos pluviales, de acuerdo con el modelo GFDLCM2, para el escenario B1 se predice un incremento de 23% de la precipitación promedio anual para el periodo simulado; mientras que para el escenario A1B disminuiría 20%. En la figura 16 se muestra el cambio anual en las precipitaciones para el periodo 2046-2085 y es posible observar que para el escenario B1 predominan los años con aumento de las mismas respecto del periodo base. Por el contrario, para el escenario A1B predominan los años con reducciones en las precipitaciones respecto del periodo base. En la figura 17 se muestra que en promedio las precipitaciones aumentarían para los meses de junio a septiembre bajo el escenario B1; mientras que bajo el escenario A1B se presentan varios meses

en los que ocurriría lo contrario, aunque se muestra un incremento promedio en septiembre y octubre.

Figura 16. Anomalía de precipitación en el periodo 2046-2085 para los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2



En el escenario B1, el incremento se dará tanto en la cantidad como en intensidad de las precipitaciones. Eventos con intensidades mayores a 60 mm en 24 horas podrían incrementarse cerca de 150% y los eventos mayores a 70 mm en 24 horas aumentarían 200% (véase figura 18).

En general, los efectos del cambio climático simulados por el modelo GFDLCM2 para el periodo 2046-2085 presentan en B1 un escenario en el que hay aumento de eventos pluviales sin una modificación significativa de evapotranspiración, lo cual propicia, asimismo, un incremento de la precipitación efectiva promedio anual. Dicho incremento se daría durante la época de lluvias y sería de 60%, cuando la temperatura promedio podría disminuir (véase figura 19). Sin embargo, en la época de estiaje la precipitación efectiva se reduciría cerca de 60%. La simulación para el escenario A1B arroja una disminución de la precipitación promedio anual y un aumento de la evaporación potencial que resulta en un descenso de la precipitación efectiva.

Figura 17. Precipitación media mensual en el periodo 2046-2085 simulado para los escenarios de emisiones A1B y B1, comparado con la línea base (20c3m), de acuerdo con el modelo GFDLCM2

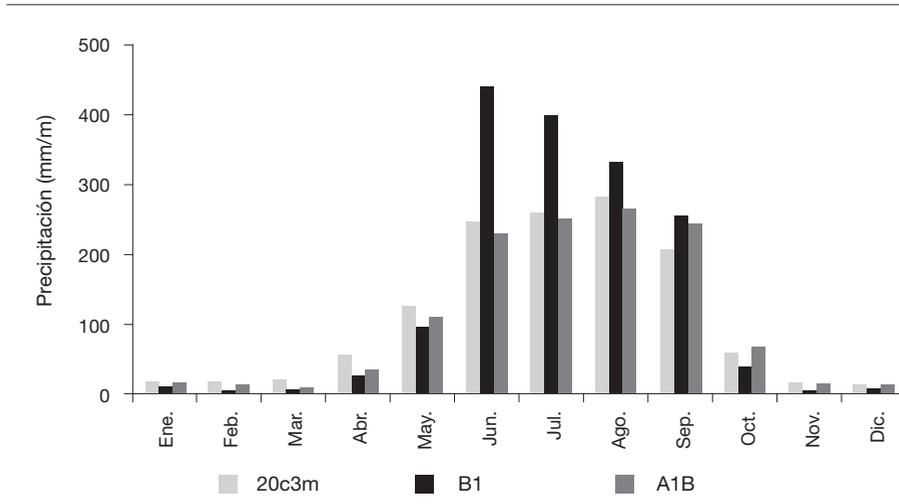


Figura 18. Porcentaje de cambio en el número de eventos extremos de precipitación para el periodo 2046-2085 correspondiente a los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2

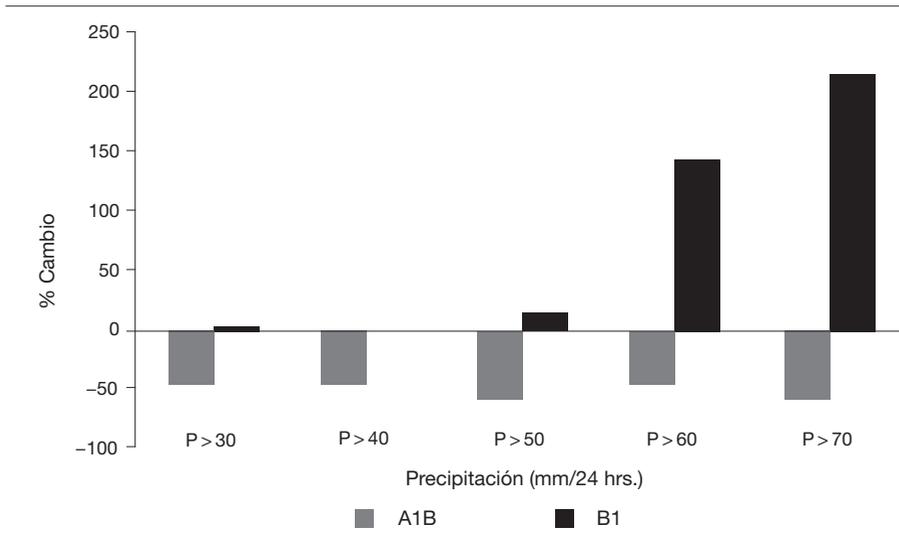
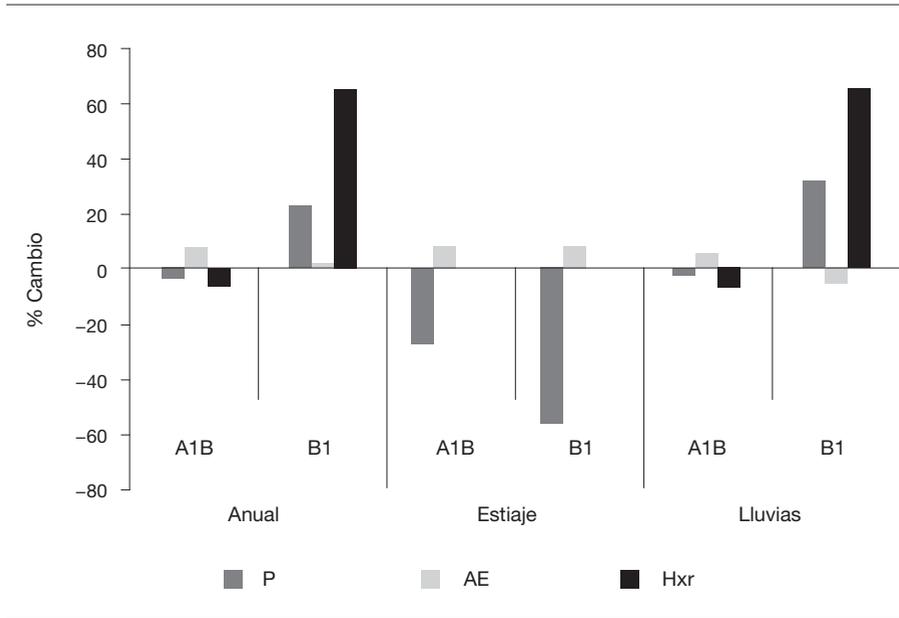


Figura 19. Porcentaje de cambio en la precipitación promedio anual (P), evaporación potencial (AE) y precipitación efectiva (Hxr) para el periodo 2046-2085, correspondiente a los escenarios de emisiones A1B y B1, de acuerdo con el modelo GFDLCM2



Para la zona norte de la ZMCM los resultados de estas simulaciones se traducirían en volúmenes de escurrimiento de $20.17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y $15.54 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para los escenarios B1 y A1B, respectivamente. Mientras que para la zona sur se interpretarían en volúmenes de recarga de $11.09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el escenario B1 y $6.28 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para el escenario A1B (véase tabla 17). Esto significa que para la zona norte habría una reducción del escurrimiento de 4.8% en el escenario A1B, pero podría presentarse un incremento de 23.2% en el escenario B1. En la zona sur, la reducción de la recarga natural dentro del escenario A1B podría ser de 5.9%, pero bajo el escenario B1 la recarga podría aumentar 66 por ciento.

Tabla 17. Volúmenes de escurrimiento para la zona norte y volúmenes de recarga para la zona sur calculados para el periodo histórico 2046-2085 correspondientes a los escenarios de emisiones A1B y B1 de acuerdo con el modelo GFDLCM2

| Escenario | Precipitación efectiva (m^3a^{-1}) | Volumen en m^3 anuales (m^3a^{-1}) | Volumen en m^3 por segundo (m^3s^{-1}) |
|--------------------|--|---|---|
| Zona norte | | Escurrimiento | |
| Línea base (20c3m) | 0.65 | 515 994 750 | 16.36 |
| A1B | 0.62 | 489 937 433 | 15.54 |
| B1 | 0.80 | 636 151 050 | 20.17 |
| Zona sur | | Recarga natural | |
| Línea base (20c3m) | 0.36 | 210 630 000 | 6.68 |
| A1B | 0.34 | 197 992 200 | 6.28 |
| B1 | 0.59 | 349 645 800 | 11.09 |

Incertidumbre en los escenarios de cambio climático

Los modelos con los que se evaluaron los posibles efectos del cambio climático en la disponibilidad del agua en la ZMCM se estimaron con base en las series de tiempo históricas para determinar tendencias futuras de su presencia, que puede verse reflejada en escorrentía superficial en la zona urbana o en la recarga del agua subterránea en el suelo de conservación, usando las salidas escaladas del modelo MCGAAO. La evaluación se desarrolla en el contexto del clima observado para el periodo histórico convencional 1961-1990 y comparado con el periodo 2046-2085. Los resultados proporcionan una plataforma para la evaluación de los impactos del cambio climático en los

recursos hídricos y pueden ser utilizados por los gestores del agua y los responsables de la planificación y el desarrollo de políticas de adaptación de los recursos hídricos.

Las proyecciones de cambio climático para la ZMCM presentan una dualidad: por un lado, el escenario B1 que se asocia con un menor incremento de la temperatura global proyecta una mayor disponibilidad de agua y, por otro, un mayor incremento en la temperatura global reflejado en el escenario A1B revela una menor existencia del recurso, lo cual podría traducirse, para el primer escenario, en más cantidad de agua de recarga para el acuífero y escorrentía superficial en la zona urbana con inundaciones, o bien, sequías para el segundo escenario.

Los resultados no son del todo inesperados, ya que otros estudios han arrojado similares conclusiones; por ejemplo, Yussoff *et al.* (2002) usando la base de datos del UKCIP98, encontraron tendencias contrarias de recarga entre los escenarios de emisiones medio-alta y medio-baja. Mendoza *et al.* (1997) evaluaron la vulnerabilidad de 12 zonas hidrológicas de México mediante los modelos GFDLR30 del Canadian Climate Center (CCC) y el CTM del Centro de Ciencias de la Atmósfera de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y encontraron que mientras el GFDLR30 predecía una disminución en las precipitaciones, el CTM presentaba un incremento sustancial. Stratus Consulting (2004), usando los resultados de diferentes GCMs, también halló que para el estado de Sonora algunos modelos sugerían un escenario más lluvioso mientras que otros indicaban mayor probabilidad de sequías para 2050. Wolde- meskel *et al.* (2014) evaluaron las incertidumbres en la estimación de sequías empleando resultados de precipitación de seis GCMs para tres escenarios y detectaron asimismo una alta incertidumbre en las proyecciones realizadas por los diferentes modelos, incluso recurriendo a un método de corrección. Shen *et al.* (2018) investigaron la incertidumbre de la variación temporal a largo plazo relacionada con la elección del GCM para predecir los impactos del cambio climático en la hidrología, utilizando 20 GCMs del CMIP5 para los escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8, y notaron que los resultados tanto de la precipitación y la temperatura como de la respuesta hidrológica pronosticada por los 20 MCGs eran inciertos y que la incertidumbre aumentó de manera significativa a lo largo del tiempo.

En la actualidad los MCGAAOS son la mejor herramienta para simular los procesos atmosféricos y sus interacciones con los océanos, con la tierra y con las masas de hielo a diferentes escalas de tiempo. Sin embargo, cuando se elaboran análisis sobre los impactos del cambio climático en el contexto regional y local existe un alto nivel de incertidumbre derivado de diversos factores: la resolución de los modelos globales, las limitaciones de conceptualización de los modelos climáticos, la representación matemática de los procesos atmosféricos y sus interacciones, los métodos de regionalización, la metodología seleccionada para simular los procesos hidrológicos, las diferencias entre las series temporales observadas y las proyectadas, y las limitaciones de información (Miller y Yates, 2005). Por lo tanto, se debe tomar en cuenta que, aunque los modelos de circulación global son una herramienta útil para producir escenarios que pueden ser utilizados en la toma de decisiones, es muy importante considerar la cadena de incertidumbre inherente a cada paso del proceso de modelación.

La metodología utilizada para evaluar la disponibilidad de agua bajo diferentes escenarios climáticos en la ZMCM presenta una guía del procedimiento sistemático a seguir para la generación de escenarios de cambio climático regional a partir de los modelos globales. Su planteamiento permite la reproducción y verificación de las condiciones climáticas e hidrológicas históricas y, por lo tanto, dan confiabilidad a los datos obtenidos en los escenarios futuros para su posterior comparación. Los resultados que se exponen en este capítulo representan únicamente un enfoque; por tanto, es posible explorar más metodologías, como la utilización de otros escenarios de GEI, diferentes MCGAAOS con distinta resolución, distintos métodos de escalamiento, uso de modelos de clima regionales, generadores estocásticos de clima, métodos hidrológicos integrados que consideren los efectos indirectos sobre la recarga de aguas subterráneas, etcétera.

De acuerdo con las proyecciones de cambio climático realizadas para la ZMCM, se espera que los eventos hidrometeorológicos extremos sean más severos y frecuentes en el futuro, lo que resultará a su vez en afectaciones sociales y económicas importantes; implicará un incremento de la vulnerabilidad del manejo de los recursos hídricos y comprometerá su sostenibilidad. Por esa razón es aconsejable que la planificación del

manejo del agua considere políticas de adaptación flexibles que permitan el ajuste bajo diferentes escenarios de disponibilidad, de tal manera que se logre la implementación de estrategias eficientes y económicas que ayuden a mejorar la sostenibilidad y la resiliencia de los recursos hídricos de la ZMCM ante el cambio climático a largo plazo.

7. Posibles impactos del cambio climático en la Ciudad de México

Ante los inminentes riesgos derivados del cambio climático y la vulnerabilidad de la ZMCM en el uso del agua, este capítulo tiene el objetivo de analizar los resultados de los dos escenarios de emisiones B1 y A1B, en los que las concentraciones de emisiones de GEI mundiales alcanzan niveles de 550 y 720 ppm, respectivamente. En la actualidad se ha llegado a las 410 ppm de emisiones de GEI y, como se explica en el capítulo anterior, en el apartado “Escenarios de emisiones de GEI”, las tendencias en el crecimiento pueden cambiar de acuerdo con el comportamiento de distintas variables globales. A escala local hemos explicado que la sobreexplotación de los acuíferos y la contaminación es resultado del incremento de la demanda del recurso, así como de la falta de acciones en múltiples áreas para optimizar su uso (véase capítulo 5). Por lo tanto, compete a las autoridades encontrar los mecanismos adecuados para mejorar las condiciones actuales del manejo del recurso y de ese modo aumentar la resiliencia de la ciudad. La solución a estos problemas implica intervenciones de naturaleza diferente en muchos ámbitos, incluidos el cambio en las concepciones sobre la gestión del vital líquido, lineamientos jurídicos, mecanismos institucionales, instrumentos de mercado y ajustes de las actividades públicas y privadas para el consumo eficiente.

Impactos del clima en el consumo doméstico desde un enfoque teórico

El consumo básico de agua de una vivienda depende de un conjunto de variables; entre ellas el clima, el nivel de ingreso de sus habitantes, el precio del líquido, el número de personas por toma y la tecnología utilizada, entre otras (Renzetti, 2002). La incidencia de las diferentes variables en la demanda de agua con diversas estructuras tarifarias muestra que el aumento de la temperatura siempre eleva su requerimiento, independientemente del tipo de esquema de cobro utilizado.

En épocas recientes se ha reconocido que el calentamiento global podría afectar la demanda de agua para todos los usos, y para uso doméstico en particular (Roy *et al.*, 2012; Haddeland *et al.*, 2014). Además, la disponibilidad del recurso se complicaría si se registrara una reducción de los suministros del recurso por la disminución de la precipitación (Whorthington y Hoffman, 2007). Existen diferentes estudios que confirman que los cambios en los patrones de temperatura y precipitación afectan la demanda de agua de los hogares y de otros sectores como el agrícola o el industrial (Zhang y Brown, 2005; Olmstead *et al.*, 2007; Yoo *et al.*, 2014). Por ejemplo, a escala doméstica se encontró que en Queensland, Australia, un aumento de 10% de lluvia reducía 1.52% el consumo de agua en las viviendas, y si la temperatura se elevaba 10%, su uso crecía 19.3%. (Whorthington *et al.*, 2009). Un estudio en la zona metropolitana de Ciudad del Cabo, Sudáfrica, reveló asimismo que si la temperatura ascendía 10%, el consumo del vital líquido hacía lo propio 3.1%, pero no se hallaron efectos significativos con los cambios en las precipitaciones (Jansen y Schulz, 2006).

En términos generales, si la temperatura y la humedad relativa del ambiente se elevan, propician un aumento de la demanda de agua, lo cual se evidencia en las costumbres observadas en ciudades con climas extremos. Por ejemplo, en urbes con mayores temperaturas promedio y mayor humedad relativa, la gente acostumbra bañarse dos y hasta tres veces al día, particularmente en contextos socioculturales como el de México. De igual forma, en ausencia de precipitación, el ascenso de la temperatura aumenta el uso de agua para labores fuera del hogar, como riego de jardines y de otras superficies para reducir el polvo.

Impactos probables en la demanda de agua para uso doméstico de la ZMCM

Los escenarios presentados en el capítulo 6, relativos a los impactos del cambio climático en el balance hídrico de la ZMCM, permiten imaginar cómo las posibles alteraciones en los patrones de temperatura y precipitación podrían afectar la demanda de agua doméstica en ese territorio (Soto y Herrera, 2016). Este análisis es relevante porque el consumo doméstico de agua utiliza 68% del total de líquido disponible. Se espera que el cambio climático tenga impactos en la disponibilidad del recurso, pero también en los hábitos de consumo de la población. Ambos factores pueden modificar considerablemente las condiciones de provisión del servicio para los organismos operadores de agua en la región.

Tabla 18. Consumo bimestral de agua en la Ciudad de México para uso doméstico (2007-2013)

| | Consumo promedio de los hogares (m ³) | Temperatura promedio (°C) | Precipitación promedio (mm) |
|---------------------|---|---------------------------|-----------------------------|
| Enero-febrero | 37.28 | 9.5 | 15.93 |
| Marzo-abril | 38.33 | 12.1 | 38.83 |
| Mayo-junio | 38.50 | 12.4 | 183.05 |
| Julio-agosto | 35.51 | 11.6 | 267.65 |
| Septiembre-octubre | 35.35 | 10.9 | 133.23 |
| Noviembre-diciembre | 36.22 | 9.4 | 14.08 |

Fuente: Datos del Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM).

Para elaborar las proyecciones sobre el impacto en el consumo, el análisis utiliza datos sobre el consumo de los hogares de la Ciudad de México, con una muestra de 58 456 usuarios con servicio medido, de un total de 2.03 millones para el periodo comprendido entre 2007 y 2013. El ejercicio sólo incluyó viviendas con servicio medido y zonas con un

suministro confiable de agua, lo que permitió dar seguimiento a los cambios en el consumo en los hogares que no enfrentan recortes en el transcurso del año. La tabla 18 muestra el consumo promedio de agua, así como la temperatura y la precipitación para cada bimestre. Según estos datos, el consumo más alto ocurrió en el periodo comprendido entre marzo y junio, coincidiendo con la época de temperaturas altas y precipitación baja o moderada, mientras que un menor consumo de agua se registró en los siguientes meses de julio a octubre, que abarcan la temporada de precipitaciones altas y temperaturas medias.

Tabla 19. Aumento promedio de la temperatura (°C)

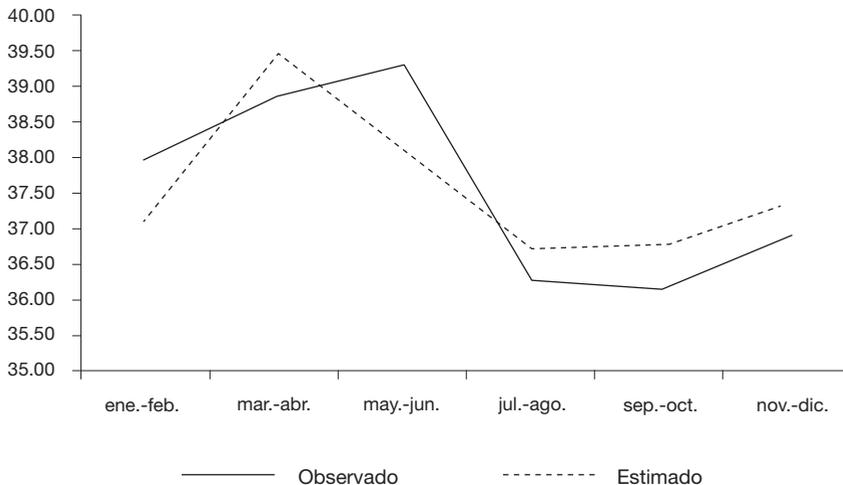
| Mes | B1 | A1B |
|------------|-------|------|
| Enero | 0.56 | 0.68 |
| Febrero | 0.99 | 1.18 |
| Marzo | 0.23 | 1.29 |
| Abril | 0.65 | 1.41 |
| Mayo | 1.18 | 1.28 |
| Junio | -0.01 | 1.00 |
| Julio | -0.64 | 1.04 |
| Agosto | -0.42 | 0.45 |
| Septiembre | 0.72 | 1.02 |
| Octubre | -0.34 | 0.98 |
| Noviembre | 0.16 | 0.87 |
| Diciembre | 0.81 | 0.65 |

Se desarrolló un modelo de regresión lineal donde la cantidad de agua consumida (Q) es la variable dependiente y la temperatura promedio (T_m) y el logaritmo de la precipitación promedio ($\ln P$) son las variables independientes. En la tabla 19 se observa que el consumo de agua se ve influido positivamente por la temperatura y negativamente

por la precipitación. El coeficiente de T_m es 1.358, lo que indica que un aumento de 10% de la temperatura está asociado con un incremento de 5% en el consumo de agua en las viviendas, mientras que el coeficiente $\ln P$ muestra que el aumento de 10% en las precipitaciones se relaciona con un descenso de 1.2% en la demanda.

Los coeficientes de regresión estimados se utilizaron para simular el periodo observado. Hubo un ajuste razonable entre el consumo examinado y el consumo simulado promedio para el periodo 2007-2013 (véase figura 20). Por lo tanto, el modelo se consideró satisfactorio para los análisis predictivos y se emplea para simular el consumo medio de agua en los hogares para los dos escenarios de cambio climático futuros. La ventaja de este enfoque es que toma en cuenta las modificaciones en temperatura y precipitación simultáneamente.

Figura 20. Comparativo del consumo promedio bimestral (m^3) entre el periodo observado 2007-2013 y el consumo estimado mediante modelo de regresión



Como se explicó en el capítulo 6, en el apartado “Impactos en el balance hídrico de la ZMCM”, la temperatura para el escenario B1 en el periodo 2046-2080 registraría un incremento a principios de año, durante varios meses que coinciden con la temporada de estiaje, o secas, cuando las precipitaciones son escasas, y también al final de año, cuando las temperaturas son más bajas. También se observan reducciones de temperatura en varios meses que coinciden con la temporada de lluvias. En el escenario A1B el incremento de la temperatura sería sostenido durante todo el año, durante varios meses, por encima de un grado centígrado (véase tabla 19).

Para determinar el impacto que podría tener el cambio de temperatura y la precipitación en la demanda de agua se utilizaron los coeficientes de regresión estimados (véase tabla 20), con el fin de proyectar el consumo promedio de los hogares para los dos escenarios. Los resultados muestran que para el escenario B1 el uso doméstico aumentaría durante casi todo el año (cinco de los seis bimestres), con un rango de 0.82 a 5%, excepto en julio y agosto, cuando disminuiría 3.1%, debido al aumento de la precipitación. En el escenario A1B los niveles de consumo de agua aumentarían todo el año, con un incremento que oscila entre 2.9% durante el cuarto bimestre y 6.3% en el segundo, que coincide con la estación de estiaje (véase figura 21).

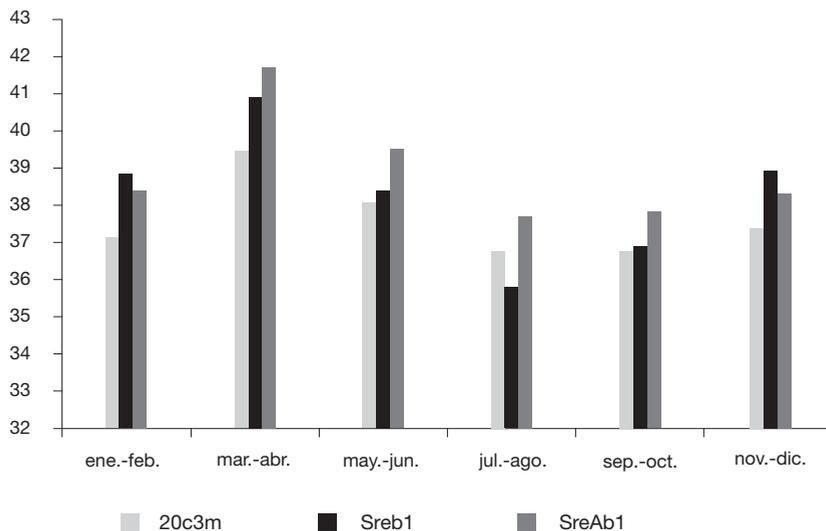
El impacto de una mayor demanda de agua en viviendas en ambos escenarios requeriría que la ciudad tuviera acceso a nuevas fuentes del recurso. Los datos indican que el consumo actual para uso doméstico equivale a $21.7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Considerando el escenario B1, la urbe necesitaría 4.7% de agua adicional durante la estación de estiaje a principios de año y aproximadamente el mismo volumen, 5%, al final. Por otro lado, en el escenario A1B, es probable que aumente el consumo de agua a lo largo de todo el año, sobre todo durante el segundo bimestre, 6.3% adicional, mientras que otros bimestres requerirían aumentos de por lo menos otro 2.9%. En la actualidad, el servicio de agua potable presenta bajos niveles de eficiencia, porque cerca de 280 colonias padecen problemas de tanques; por lo tanto, se anticipa que sin acciones que consideren la sustentabilidad y optimicen el suministro, la mayoría de los hogares enfrentará recortes más frecuentes durante la estación de estiaje para el escenario B1, en tanto que la restricción del abasto podría generalizarse a lo largo del año para el escenario A1B.

Tabla 20. Modelo de regresión del consumo doméstico de agua

| Nombre de la variable | Variable | Coefficiente | Std. Error |
|--|----------|--------------|------------|
| Consumo promedio bimestral (m ³) | Q | 27.056** | 4.023 |
| Temperatura promedio | Tm | 1.358* | 0.482 |
| Logaritmo de la precipitación promedio | LnP | -1.238* | 0.488 |

Nivel de significancia: * p < 0.01; ** p < 0.05

Figura 21. Consumo promedio bimestral (m³) simulado para la ZMCM, periodo base 20c3m y periodo 2046-2085, en los escenarios de emisiones A1B y B1



Impactos por el cambio en la precipitación

Otro impacto que puede tener el cambio climático es la modificación de las precipitaciones. Recordemos que en el escenario B1 existe la posibilidad de que aumenten de manera importante los niveles de precipitación efectiva durante la época de lluvias, particularmente en los meses de junio, julio y, en menor medida, agosto, mientras que el resto de los meses permanecerían sin cambios significativos. Por el contrario, en el escenario A1B dichas precipitaciones registran un descenso considerable durante varios meses y el balance total es una disminución de la precipitación efectiva (véase tabla 21).

Tabla 21. Valores promedio de la precipitación (mm), línea base 20C3m y escenarios

| Mes | 20c | B1 | AB1 |
|------------|--------|--------|--------|
| Enero | 16.05 | 11.78 | 16.43 |
| Febrero | 17.16 | 4.48 | 12.32 |
| Marzo | 20.82 | 7.44 | 9.30 |
| Abril | 55.23 | 26.10 | 34.80 |
| Mayo | 126.05 | 94.86 | 110.67 |
| Junio | 246.13 | 440.40 | 228.30 |
| Julio | 259.71 | 398.04 | 250.79 |
| Agosto | 281.38 | 332.32 | 264.43 |
| Septiembre | 206.86 | 255.00 | 244.80 |
| Octubre | 60.49 | 37.51 | 67.58 |
| Noviembre | 14.99 | 5.10 | 14.70 |
| Diciembre | 13.38 | 6.20 | 12.71 |

En la Ciudad de México el agua de lluvia tiene dos destinos principales: la recarga del acuífero en el suelo de conservación y el drenaje en el suelo urbano. Lo anterior significa que dentro del escenario A1B, en la zona urbana, la cantidad de agua pluvial se reduciría 5% al parar en el drenaje, mientras que en el suelo de conservación el volumen de recarga natural disminuiría 5.9% en promedio. En este caso, el número de eventos extremos de precipitaciones descendería de manera importante, por lo que el riesgo de inundaciones también lo haría en el suelo urbano. El problema es que de igual manera la recarga del acuífero se reduciría 5.9%, lo que a su vez disminuiría las fuentes de agua local. Este estudio no evaluó el impacto en las fuentes externas, pero es probable que del mismo modo la disponibilidad en éstas se vea limitada, lo cual podría generar una situación crítica de escasez del recurso a escala regional.

En el caso del escenario B1, donde los patrones de precipitación se modifican de forma sustancial, aumentaría la cantidad de agua que sería posible capturar en el suelo de conservación. Hoy en día se estima que se recargan $6.68 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y bajo este escenario sería posible aumentar la recarga a $11.09 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, lo que representa un incremento de 66%. A partir del aumento de la infiltración, las autoridades podrían decidir no extraer el excedente con el propósito de mitigar la sobreexplotación del acuífero, o bien contar con $4.4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ adicionales para canalizarlos al sistema de abasto. Además, en el suelo urbano sería viable la potencial construcción de infraestructura para almacenar agua pluvial, tratarla y distribuirla, de manera que podrían obtenerse beneficios por el aumento de las precipitaciones. Aunque también debe contemplarse el riesgo de que las lluvias extremas agudicen la necesidad de tratamiento para la potabilización del agua, porque las fuentes superficiales pueden sufrir un impacto negativo en términos de calidad (Williams *et al.*, 2018).

Un problema relacionado con las precipitaciones es la posibilidad de aumento en los eventos de inundaciones. El agua pluvial descargada al drenaje actualmente es de $16.33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$; bajo el escenario A1B aumentaría a $20.17 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, lo cual representa un incremento de 23% en la cantidad de líquido derivada de dicha acción, que si no se aprovecha iría hacia el drenaje, con el consecuente riesgo de inundaciones y problemas relacionados. En este escenario B1, a diferencia del A1B, se presenta un incremento en la intensidad de lluvias, de manera que las precipita-

ciones mayores a 60 y 70 mm en 24 horas podrían aumentar de 150 a 200%. Es importante resaltar que los eventos pluviales de tal magnitud han provocado caos regional en varias partes de la ciudad durante los últimos años.

En la tabla 22 se muestran los volúmenes de descargas que recibe el drenaje de la ZMVM, considerando tanto a la Ciudad de México como a los municipios conurbados del Estado de México. La cantidad que se vierte durante época de estiaje es de $23 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, mientras que en la época de lluvias tan sólo las descargas de agua pluvial suman $42 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Con el fin de evitar riesgo de inundaciones graves en la urbe se inició la construcción del Túnel Emisor Oriente, con capacidad de $150 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, que de hecho busca reducir los riesgos en caso de una falla en el emisor central durante la época de lluvias. En caso de presentarse el escenario B1, el aumento de precipitaciones generaría un mayor número de descargas pluviales, de cerca de $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pero, al parecer, gracias a la infraestructura que se está construyendo sería suficiente para canalizar el excedente de las mismas.

Tabla 22. Volúmenes de descargas al drenaje en m^3s^{-1}

| | Temporada de secas | Temporada de lluvias |
|--|--------------------|----------------------|
| Descargas al drenaje actual | 23 | 42 |
| Descargas al drenaje (escenario B1, 2046-2080) | 23 | 72 |

Fuente: Elaboración propia con datos de Conagua-Semarnat, 2008.

Sin embargo, no sólo debería revisarse el sistema central de drenaje sino también los sistemas secundarios. En años recientes la ciudad ha sufrido varias inundaciones que se explican por la incapacidad de dichas redes alternas de canalizar la enorme cantidad de agua que cae en periodos cortos. La tabla 23 muestra datos de algunas de esas eventualidades suscitadas en territorio capitalino durante 2016 y 2017. Estos acontecimientos han causado caos en diversas partes del suelo urbano, afectando vialidades importantes, con pérdidas de automóviles, inundaciones de viviendas y afectaciones al sistema de transporte y a la

infraestructura pública y privada. Según cifras oficiales, se registraron 34 casos de inundaciones en 2017 y 31 en 2018, aunque se desconoce el número de casas afectadas.

Un tema que apenas había sido analizado por las autoridades es la conveniencia de construir infraestructura para captar agua de lluvia. De acuerdo con el Sacmex (SACM, 2012), la construcción de una red de drenaje pluvial de 6 000 km tendría un costo aproximado de 15 000 millones de pesos. Sin embargo, existe una serie de acciones que pueden explorarse para aumentar la capacidad de infiltración y almacenamiento de agua pluvial en la ciudad; por ejemplo, la infiltración en los terrenos de viviendas, áreas verdes, pavimentos permeables, pozos de infiltración y la captación en sistemas de techos para pequeños reservorios domiciliarios en patios y jardines, reservorios en predios industriales, etcétera (SADS, 2015).

Tabla 23. Eventos de inundaciones en la ZMCM, 2016 y 2017

| Fecha | Zona afectada | Precipitaciones | Descripción |
|----------------------|--|-----------------|---|
| 30 de agosto de 2018 | Iztapalapa, Coyoacán, Tlalpan y Cuajimalpa | 53.34 mm | Las vialidades más afectadas por las inundaciones fueron Periférico esquina Boulevard de la Luz, Calzada Ermita y Eje 6 Sur, Periférico esquina Línea 1, Avenida del Imán esquina Aztecas, Periférico esquina Santa Teresa, Calzada Zaragoza esquina Cayetano Andrade, Calzada Zaragoza esquina República Federal Sur, Periférico (Bajo Puente) Picacho-Ajusco y Periférico y Santa Teresa. |

| | | | |
|--|--|-------------------------------|---|
| | | | <p>En total se registraron 84 encharcamientos en la Ciudad de México: 44 en Iztapalapa, 15 en Tlalpan, 10 en Coyoacán, 9 en Álvaro Obregón, 5 en Cuajimalpa y 1 en Benito Juárez.</p> |
| <p>1, 5, 6 y 7 de septiembre de 2017</p> | <p>Tlalpan, Coyoacán y Xochimilco, en la Ciudad de México</p> <p>Tlalnepantla, Cuautitlán Izcalli y Ecatepec, en el Estado de México</p> | <p>Rango 50 mm-140 mm</p> | <p>Daño a 400 casas, 300 vehículos, 26 colonias.</p> <p>Inversión de 700 millones de pesos del gobierno capitalino.</p> <p>Inundaciones en las colonias Tepeolulco, San Juan Ixhuatepec y Lázaro Cárdenas o La Presa, así como Avenida San José.</p> <p>Pobladores reportaron en redes sociales que al menos 15 vehículos fueron arrastrados por el agua en Avenida San José en La Presa.</p> <p>Las autoridades de Tlalnepantla confirmaron la muerte de una persona de 50 años, quien caminaba por una calle de la colonia La Presa y fue arrastrada por el agua en una canaleta.</p> |

| | | | |
|-----------------------------|---|-----------------|---|
| <p>31 de agosto de 2017</p> | <p>Cuautitlán Izcalli y Nezahualcóyotl, en el Estado de México</p> <p>Tláhuac, Tlalpan e Iztapalapa, en la Ciudad de México</p> | <p>66.28 mm</p> | <p>Desbordamiento de la presa El Ángulo, el Gran Canal y el Canal de Chalco, que afectaron principalmente a Tláhuac e Iztapalapa. Ocurrieron 246 reportes por afectaciones en 12 alcaldías. Resultaron afectadas 28 colonias, entre ellas 25 de Julio, San Felipe de Jesús, Providencia y González, Pensador Mexicano y Nueva Atzacolco.</p> <p>Colapso del tránsito vehicular y del funcionamiento del transporte público en varios puntos de la ciudad y del Estado de México. Afectación a 140 vialidades y a las actividades del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México.</p> <p>Las personas reubicadas en albergues fueron 300.</p> |
| <p>2 de junio de 2016</p> | <p>Iztapalapa</p> | <p>55 mm</p> | <p>En el Estado de México se desbordaron los ríos San Juan y San José Huilango.</p> <p>Resultaron afectadas 7 000 personas y 1 700 viviendas en Iztapalapa.</p> |

| | | | |
|---------------------|--------------------------------|----------|---|
| 28 de julio de 2016 | Tultitlán, Estado de México | 174.5 mm | <p>En Tultitlán se reportó que el agua anegada alcanzó un metro y medio altura.</p> <p>Desbordamiento de un canal de aguas negras.</p> <p>El lodo y la basura arrastrados por las fuertes lluvias taparon las coladeras y propiciaron las inundaciones. El agua ingresó a estacionamientos y casas de la colonia Ampliación del Tesoro.</p> <p>La avenida López Portillo (principal vía del municipio) se vio afectada en ambos sentidos.</p> |
| 29 de mayo de 2017 | Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco | 98.5 mm | <p>Afectó vías principales como Calzada de las Bombas, Avenida Miramontes, Paseo del Pedregal, Picacho-Ajusco, División del Norte y Acoxta.</p> <p>A través del 911 se recibieron aproximadamente 800 reportes que fueron canalizados por diversas alcaldías, Protección Civil, Secretaría de Seguridad Pública, Sistemas de Aguas, CFE, Metro y Metrobús.</p> |

| | | | |
|--------------------------|--|---------|---|
| 23 de agosto de 2016 | Ecatepec, Estado de México | 209 mm | La lluvia dejó afectaciones en las colonias Ciudad Azteca, Florida, San Agustín (Segunda Sección), Valle de Aragón, Valle de Anáhuac y Río de la Luz. La primera alcanzó 60 cm de inundación. |
| 28 de septiembre de 2016 | Iztapalapa Nezahualcóyotl, Estado de México | 86.8 mm | <p>Cierre del transporte público Metro y vialidades afectadas por la fuerte lluvia.</p> <p>Inundaciones en las colonias Ermita Zaragoza y La Colmena en Iztapalapa, situadas en los límites con el Estado de México. Inundación de la Calzada Ignacio Zaragoza en su entronque con la carretera México-Texcoco.</p> <p>En Nezahualcóyotl hubo afectaciones en las colonias Águilas, Ampliación de las Águilas, La Perla, Vicente Villada y Loma Bonita, donde el agua penetró en las casas.</p> |

Fuente: Elaboración propia a partir de P. Aldaz, (7 de septiembre de 2017); A. Ahedo, (6 de septiembre de 2017); P. Aldaz, (31 de agosto de 2017); M. Barrera, (5 de septiembre de 2017); CDMX (2017); *El Universal* (7 de septiembre de 2017); *El País* (septiembre de 2017); A. Pavón, (29 de mayo de 2017); S. Hernández, (2 de junio de 2016); F. Ruiz-Palacios, y R. Jiménez, (25 de julio de 2016); *Excélsior* (28 de julio de 2016) y M. Velasco, (agosto y septiembre de 2016).

La Ciudad de México cuenta con experiencias interesantes en el tema. En la captación de agua pluvial para uso doméstico la organización civil Isla Urbana ha instalado cerca de 4 000 sistemas en la zona de Tlalpan y Xochimilco (véase <http://islaurbana.org/sistemas-de-ciudad/>). La actual administración del Gobierno de la Ciudad de México pretende instalar 10 000 sistemas similares en colonias de Iztapalapa y Xochimilco con el objetivo de mejorar el acceso al agua para la población (véase <https://www.cdmx.gob.mx/storage/app/media/uploaded-files/presentacion-programa-captacion-agua-lluvia-viviendas.pdf>). En el caso de pozos de infiltración, echó a andar un proyecto piloto en dos etapas que incluyó 13 pozos de absorción y se inició la construcción de una planta de bombeo en el sur de la ciudad, con una inversión de alrededor de 74 millones de pesos. Los sistemas incluyen filtros para retirar sedimentos, basura y aceite del agua que escurre en este punto antes del ingreso al pozo de absorción (véase <http://hidropluviales.com/2016/02/29/pozos-contrainundaciones-agua-del-futuro/>). Dichas acciones pueden regular los flujos de agua y disminuir las inundaciones.

Además, es fundamental preservar y mejorar la cobertura vegetal para retardar la llegada de los flujos de agua sobre el suelo urbano. De la misma forma, es importante mantener las condiciones del suelo de conservación y de las áreas boscosas de zonas periurbanas con las que aún cuenta la ciudad, pues cuando se retira la cobertura vegetal, aumenta la escorrentía y la magnitud de la inundación. El tema de la vegetación también es relevante bajo escenarios de reducción de las precipitaciones, como amortiguamiento al calor y al polvo.

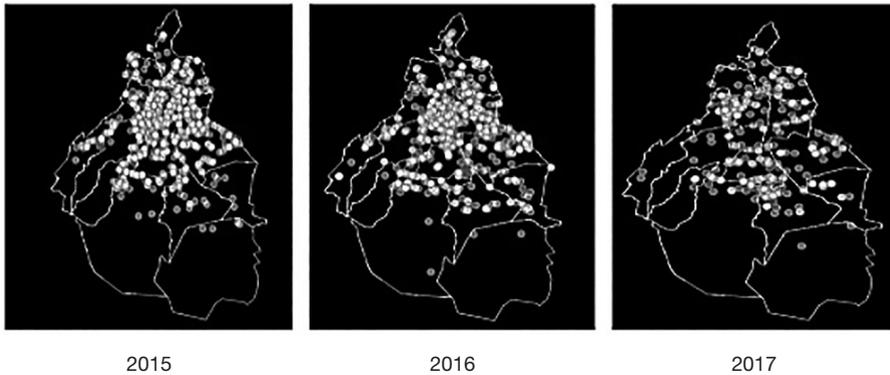
Opciones como éstas pueden generar beneficios colaterales para la propia región en lugar de expulsar el agua pluvial. Con el fin de dimensionar las inversiones de las que podría prescindirse, cuyo enfoque se concentra en evitar inundaciones y excluye la variable ambiental de aprovechamiento, es relevante mencionar que el costo del emisor central para aumentar la capacidad de drenaje de la ciudad ascenderá a 46 263 millones de pesos.

En época de lluvias el potencial actual para capturar agua en el drenaje es de $128 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, pero con el escenario B1 el aumento de precipitaciones generaría un incremento de descargas pluviales de cerca de $30 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, lo cual suma $158 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Hasta el momento se ha preferido optar por políticas intensivas en capital para resolver el riesgo de inundaciones, como

la construcción del Túnel Emisor Oriente, en lugar de explorar políticas de aprovechamiento del agua pluvial. No existen estudios suficientes que planteen diferentes alternativas y costos para utilizarla. En cambio, siempre se cuenta con información sobre el precio unitario de fuentes de abasto externo que, por ejemplo, se estiman en 9.46 pesos por m³ de agua proveniente del valle del Mezquital, considerando que dicho valor no incluye el monto de las externalidades ambientales y sociales que se generen en la zona (Conagua, 2005).

Bajo el escenario A1B, otra ventaja de retener el agua pluvial es que reduce la dependencia de fuentes externas y atiende aspectos de equidad regional. Cabe mencionar que este tipo de inversiones debe realizarse con cautela porque el número de eventos extremos y su intensidad aumentarían bajo el escenario B1; en el A1B la precipitación se reduciría, de manera que la infraestructura podría quedar subutilizada.

Figura 22. Mapas de eventos de inundación/encharcamientos en 2015-2017



Respecto del riesgo de inundaciones y afectaciones a la infraestructura urbana y a la seguridad de la población, existe información que actualmente procesa el Gobierno de la Ciudad de México y que ofrece el *Atlas público de peligros y riesgos de la Ciudad de México* (véase: <http://www.atlas.cdmx.gob.mx/index.php>). En los mapas de este organismo se procesan datos sobre eventos de inundaciones, temperaturas y otros riesgos. Es importante sistematizar esos aportes con el fin de conocer

con precisión las zonas de riesgo y tomar las acciones pertinentes para aminorar los efectos negativos de eventos extremos. En la figura 22 aparecen los mapas con los sitios que, según el atlas, han sufrido encharcamientos y/o inundaciones, reportados de 2015 a 2017. Sin embargo, aún no es posible saber la magnitud de cada uno, sin lo cual es difícil tomar decisiones en materia de planeación, pues, según las imágenes, prácticamente toda la ciudad —con excepción del suelo de conservación— presenta eventos de inundaciones.

En el tema de las inundaciones cabe mencionar la recomendación sobre proveer información confiable a los agentes de mercado y a otros actores relevantes para que instrumenten sus propias medidas de adaptación. Stern (2006) recomienda que las aseguradoras jueguen un papel importante para desincentivar la construcción y venta de propiedades en zonas con riesgo alto de inundaciones. En países como México, ante la falta de estímulos u obligaciones para comprar seguros que cubran esa clase de eventualidades, ha sido el propio gobierno el que ha adquirido diversos esquemas al respecto. El Gobierno de la Ciudad de México adquirió un plan de seguro con una asignación presupuestaria de 212.5 millones de pesos (11.1 millones de dólares), administrado por la Oficialía Mayor, en coordinación con el Sistema de Agua. Bajo ese mecanismo las viviendas inundadas pueden obtener una compensación por daños sufridos, además de que el gobierno también cubriría algunas afectaciones a la infraestructura pública (Romero, 2017). El esquema es novedoso porque compensa parte de los deterioros, pero deja fuera muchos otros costos que sufre la ciudad durante las inundaciones. De cualquier manera, es fundamental que los planes de desarrollo urbano y las licencias de construcción consideren los lugares con mayor riesgo de padecer esas contingencias y se lleven a cabo acciones para frenar la urbanización en zonas altas que tienen un impacto directo en las escorrentías de agua hacia el área urbana.

Opciones de política pública para mejorar la resiliencia de la ciudad

Hemos revisado previamente los problemas que enfrenta la ZMCM en torno al manejo del servicio de abasto de agua y drenaje y que la colocan en un nivel bajo de resiliencia (véase capítulo 5). En los programas de inversiones de la Conagua y del Sacmex aparecen una serie de medidas diseñadas para mejorar la eficiencia del sistema actual. Desafortunadamente, hasta el momento ni las autoridades federales, a través de Conagua, ni las locales, a través del Sacmex, han dirigido los recursos necesarios para implementar varias de las acciones contempladas. Algunas medidas programadas pueden suponer un tipo de adaptación autónoma; es decir, los ajustes no constituyen una respuesta consciente al cambio climático, sino que se derivan de evaluaciones para resolver problemas actuales. Sin embargo, pueden reducir los impactos negativos producidos por las alteraciones del clima.

La tabla 24 muestra las principales inversiones que se consideran necesarias para reducir la vulnerabilidad de la región en materia de agua. Desde la perspectiva regional, se estimaba que se requería una inversión de 50 000 millones de pesos en 2015 para atender temas de abasto de agua, saneamiento, drenaje y ordenamiento. El monto que le correspondería a la Ciudad de México era de más de 22 000 millones de pesos (44 por ciento).

En las administraciones de 2006 a 2018 el rubro que recibió mayores recursos fue drenaje y saneamiento, particularmente para la construcción del Túnel Emisor Oriente y la planta de tratamiento de aguas residuales de Atotonilco. También se han hecho inversiones para perforar los pozos profundos, hasta de dos kilómetros, con el fin de extraer mayor volumen de agua y cubrir parte de la demanda de la zona de Iztapalapa. El monto de inversión total hace referencia a los costos para reducir la vulnerabilidad de la ciudad y resolver los problemas inmediatos. Sin embargo, también es necesario considerar los costos que pueden derivar del cambio climático: el aumento de la demanda de agua, la escasez del recurso a nivel local o el riesgo de inundaciones por eventos extremos.

Tabla 24. Inversiones necesarias para reducir la vulnerabilidad de la región en materia de agua

| Programa de Manejo Sustentable del Agua para el Valle de México en 2015 | | | |
|---|-------------------------------|----------------------------------|--|
| Proyecto | Caudal (m ³ /s) | Inversión (millones de pesos) | Costo unitario* (pesos/m ³) |
| Abastecimiento de agua | | | |
| Reducir niveles de pérdidas y desperdicio | 7 | 4 000 | 2.31 |
| Frenar la sobreexplotación de acuíferos e impulsar proyectos de recarga | 6 | 4 500 | 8.03 |
| Tratamiento de aguas residuales (incremento de reúso) | 4 | 1 000 | 3.16 |
| Nuevos aprovechamientos de agua superficial en la cuenca | 4 | 2 000 | 3.52 |
| Mezquital: reúso intensivo | 6 | 5 500 | 9.46 |
| Cutzamala | | | |
| a) Rehabilitación y adecuación | 3.5 | 3 000 | 7.97 |
| b) Temascaltepec | 4.5 | 1 500 | 5.85 |
| Subtotal | 35 | 21 500 | 4.98 |
| Ordenamiento, drenaje y saneamiento | | | |
| Ordenamiento territorial y restauración de cuencas | | 4 000 | |
| Reforzamiento del sistema de drenaje del valle de México | | 16 500 | |
| Saneamiento de las descargas del valle de México | 50 | 8 000 | 1.42 |
| Subtotal | 50 | 28 500 | 1.42 |

| Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México en 2012 | | |
|--|-------------------------------|----------------------------------|
| Proyecto | Caudal (m ³ /s) | Inversión (millones de pesos) |
| Abastecimiento de agua | | |
| 1. Suelo de conservación (protección) y recarga del acuífero (agua pluvial y tratada) | 2.77 | 3 851 |
| 2. Consumo de agua potable (nuevas fuentes con la participación en el Plan Hidráulico del Valle de México) | 10 | 2 028 |
| 2.1 Consumo de agua potable. Mejoramiento del sistema comercial-medición y tarifas | 2.2 | 2 728 |
| 3. Detección y supresión de fugas | 3 | 2 970 |
| 4. Parques lacustres y áreas de alto valor ambiental | 1 | 436 |
| Subtotal | 18.97 | 12 013 |
| Drenaje y saneamiento | | |
| 5.1 Construcción del Túnel Emisor Oriente | | 2 999 |
| 5.2 Plantas de tratamiento y reúso de agua residual tratada | 40 | 4 170 |
| 5.3 Otras obras de drenaje, tratamiento y reúso (emisor central, plantas de bombeo, etcétera) | | 2 955 |
| Subtotal | 40 | 10 124 |

Fuente: Elaborado con base en GDF, 2012, y Conagua, 2015.

* Demanda adicional por crecimiento de la población 11.41(m³/s). Población estimada de 23.72 millones de habitantes en la ZMMV.

Existen opciones de políticas públicas para mejorar la gestión del agua por el lado de la oferta y la demanda bajo paradigmas de sustentabilidad. Por el lado de la oferta, es importante invertir en la modernización del sistema de distribución de agua para recuperar la que se pierde por fugas. Se pueden hacer inversiones para aprovechar el agua de lluvia, que en el suelo de conservación requeriría mantener y mejorar la capacidad de infiltración de las áreas periurbanas de la ciudad. En el suelo urbano serían necesarios proyectos que mejoren la captura e infiltración de agua pluvial en viviendas y otras áreas construidas, promover la investigación y utilización de materiales que permitan ese proceso o incluso pozos de infiltración de agua pluvial. La modernización del sistema de distribución del líquido también supone su capacidad para distribuirlo de manera homogénea y controlada entre diferentes zonas de la ciudad y garantizar el acceso a colonias que ahora sufren escasez.

También se puede considerar la opción de reasignar el recurso existente entre sectores, es decir, el doméstico, el industrial-comercial y el agrícola, lo cual puede conducir a establecer criterios sobre el consumo de agua potable en actividades que cubren las necesidades humanas básicas e inducir a otros sectores a utilizar agua tratada o de segundo uso. Este tipo de política pública supondría prohibir el uso de agua para determinadas actividades y generar las condiciones para el desarrollo de un mercado de agua tratada eficiente y moderno. También puede suponer que algunos sectores con un consumo intenso de agua de primer uso vean como alternativa moverse hacia cuencas menos explotadas.

En términos de gasto de agua a escala doméstica es necesario desarrollar sistemas tarifarios que reconozcan la capacidad y la disposición de pago de los habitantes y que envíen las señales correctas de escasez del recurso. Lo anterior implica reducir los subsidios al agua potable para este sector; de la misma forma que para sus contrapartes comercial e industrial, así como tener una cobertura universal de medidores y garantizar su mantenimiento.

La promoción de la tecnología puede tener un papel preponderante pues reduce el uso del recurso a partir de la instalación de equipos y aparatos eficientes en todos los sectores: doméstico, comercial, industrial y agrícola. Políticas encaminadas a la eficiencia y la equidad también deben fortalecer el sistema de inspección y vigilancia para evitar

tomas clandestinas, alteraciones de medidores y prácticas de corrupción en la distribución del recurso. Todo esto será más fácil si se complementa con campañas educativas e informativas que sensibilicen a la población sobre el problema. Además, es importante asegurar la participación de representantes de la sociedad en la toma de decisiones durante el rediseño de políticas públicas en el sector.

Conclusiones

En México los efectos del cambio climático se han manifestado a través de una secuencia de desastres de origen hidrometeorológico con graves daños sociales, materiales y ecológicos. En la ZMCM, dados los problemas con el suministro de agua potable, es de gran importancia conocer el riesgo adicional que se impondrá debido a modificaciones en los patrones de precipitación y temperatura ocasionados por el calentamiento global. Resulta esencial considerar los escenarios futuros de cambio climático que permitan estimar la vulnerabilidad a condiciones anómalas en el ambiente y proponer estrategias para enfrentar sus efectos.

Desde principios de 1990 los modelos de circulación global han sido desarrollados y mejorados por los centros especializados en el tema de todo el mundo con la finalidad de modelar los impactos del cambio climático. Los resultados han sido utilizados para realizar investigaciones en muchos países, incluido México (Landa *et al.*, 2008; Martínez-Austria y Aguilar-Chávez, 2008; Gómez *et al.*, 2008; cicc, 2007; Herrera-Pantoja y Hiscock, 2015; Soto-Montes y Herrera-Pantoja, 2016).

Los posibles impactos del cambio climático en el servicio de abasto de agua potable en la ZMCM se han presentado para ejemplificar los retos futuros. Aquí se explica cómo el uso de datos escalados del modelo de circulación global acoplado de la atmósfera y el océano, GFDLCM2, permite producir, a partir de series de tiempo de temperatura, precipitación, evapotranspiración real y precipitación efectiva, información para dos escenarios de emisiones de GEI, el A1B y el B1, dentro del periodo 2046-2085. En general, los resultados simulados por el modelo GFDLCM2 para el escenario B1 revelan un aumento de la precipitación y una disminución de la evapotranspiración durante la temporada invernal, por lo que hay un incremento en la precipitación efectiva promedio anual. Por el contrario, la simulación para el escenario A1B indica una disminución en la precipitación promedio anual y un incremento en la evaporación potencial, que se traducirá en la disminución de la precipitación efectiva para el periodo 2046-2085.

De acuerdo con la información expuesta, es posible observar algunas razones que explican el bajo nivel de resiliencia de la ZMVM, asociado al peligro de deterioro del servicio que pone en riesgo el acceso al agua, aun sin considerar los impactos del cambio climático. Los resultados que arrojó el análisis de ambos escenarios en estudio revelaron que la demanda del recurso aumentará debido al incremento de la temperatura promedio en la ZMCM. El aumento en la demanda aunado a una reducción en la oferta, que actualmente ya se presenta en diversas alcaldías, podría propiciar que los hogares enfrenten recortes sistemáticos y severos del servicio, sobre todo durante la época de estiaje.

Por otro lado, el cambio de las precipitaciones afectaría de manera diferenciada el suelo de conservación y el urbano. En el primero impactaría la cantidad de agua que se recarga en el acuífero, y en el segundo, el volumen de agua pluvial que recibe el sistema de drenaje. Uno de los escenarios revela la posibilidad de enfrentar riesgos por la insuficiente infraestructura de drenaje secundario, con el consecuente costo de desastres por inundaciones y seguridad de la ciudadanía.

En las medidas de adaptación se resalta la importancia de llevar a cabo las acciones necesarias para reducir las deficiencias del sistema actual, a través de una serie de políticas que ya han sido presupuestadas. Esto llevaría a una adaptación paulatina y, por consiguiente, a reducir el nivel de vulnerabilidad de la ciudad. Una vez implementadas estas medidas, se debe tomar en cuenta que el cambio climático impondrá otros costos derivados del aumento en la demanda de agua y posibles importes asociados a la infraestructura de drenaje y de esquemas de protección civil. Sin embargo, existe la alternativa de que las autoridades también puedan explotar los beneficios del cambio climático, sobre todo en términos del potencial de recarga del acuífero y del uso de sistemas de captación de agua pluvial, en particular si se presentara el escenario A1B. Así, enfatizamos la recomendación de utilizar un enfoque de gestión integrada del recurso hídrico, el cual considera un rango de procesos y acciones de oferta y demanda, de manera que pueda obtenerse una perspectiva equilibrada de las estrategias a seguir.

Glosario

Acuífero. Formación geológica permeable capaz de almacenar, transmitir y proporcionar cantidades aprovechables de agua (WMO-Unesco, 2013).

Acuitardo. Formación geológica de baja conductividad hidráulica que transmite agua muy lentamente (WMO-Unesco, 2013)

Anomalía del clima. El promedio anual de temperaturas siempre ha variado, oscilando entre periodos fríos y cálidos. Sin embargo, es evidente que en cada una de las tres últimas décadas se ha producido un aumento progresivo de la temperatura de la superficie de la Tierra, mayor que en cualquier década precedente desde 1850, lo que denota una anomalía respecto a los registros (IPCC, 2013, pp. 3 y 4). También se dice de la diferencia entre el valor de un elemento climático en un lugar dado y el valor medio de dicho elemento.

Atmósfera. Envoltura gaseosa que circunda la Tierra. La atmósfera está compuesta casi por completo de nitrógeno (coeficiente de mezclado volumétrico: 78.1%) y oxígeno (coeficiente de mezclado volumétrico: 20.9%), más cierto número de gases traza, como el argón (coeficiente de mezclado volumétrico: 0.93%), el helio, y ciertos gases de efecto invernadero radiativamente activos, como el dióxido de carbono (coeficiente de mezclado volumétrico: 0.035%) o el ozono. Además, la atmósfera contiene vapor de agua, que es también un gas de efecto invernadero, en cantidades muy variables, aunque, por lo general, con un coeficiente de mezclado volumétrico de 1% aproximadamente. La atmósfera contiene también nubes y aerosoles (IPCC, 2007).

Clima. El clima es la suma del promedio de las variables atmosféricas que afectan a una determinada zona geográfica en periodos largos (30 años). Hay que evaluar los patrones de variación en temperatura, precipitación, humedad, presión atmosférica y viento. Los factores que influyen sobre el clima son latitud, altitud, orientación del relieve respecto de incidencia de los rayos solares o de la de los vientos predominantes, las corrientes oceánicas y la continentalidad (IPCC, 2007).

Cobeneficios. Beneficios reportados por políticas que, por diversas razones, se implementan de manera simultánea, considerando que la mayoría de las políticas definidas con miras a mitigar los efectos de los gases de efecto invernadero responden también a otras razones, en ocasiones no menos importantes (relacionadas, por ejemplo, con los objetivos de desarrollo, sostenibilidad y equidad) (IPCC, 2007).

El Niño Oscilación Austral (ENOA). El Niño Oscilación del Sur es un patrón climático que consiste en la oscilación de los parámetros meteorológicos del Pacífico ecuatorial cada cierto número de años. Presenta elevación de la temperatura oceánica en el Pacífico oriental y está a su vez relacionada con oscilación de la presión atmosférica en el Pacífico occidental (IPCC, 2007).

Escenario de emisiones. Son instrumentos para analizar la forma como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico y el cambio tecnológico influirán en la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2007).

Escorrentía. Parte de la precipitación que no se evapora ni es transpirada, pero que fluye sobre la superficie del terreno y retorna a las masas de agua (IPCC, 2007).

Evapotranspiración real/evapotranspiración efectiva. Cantidad de agua evaporada y transpirada desde el suelo y la cubierta vegetal (WMO-Unesco, 2013).

Evapotranspiración. Proceso combinado de evaporación de agua en la superficie de la Tierra y de transpiración de la vegetación (IPCC, 2007).

Forzamiento radiativo. El efecto invernadero natural forma parte de un sistema equilibrado de transferencia y transformación de energía en la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos. El clima terrestre permanece estable en gran medida porque la cantidad de energía que recibe la Tierra equivale a la que desprende (el balance energético está equilibrado). Sin embargo, hay factores que han provocado cambios notables en el sistema climático. Como estos factores impulsan o fuerzan la modificación del sistema se denominan *forzamientos*. El forzamiento radiativo permite cuantificar las modificaciones en los flujos de energía provocadas por estos impulsores. Cuando el forzamiento radiativo es positivo, se produce un calentamiento de la superficie, y cuando es negativo, un enfriamiento (IPCC, 2013).

Gas de efecto invernadero (GEI). Componente gaseoso de la atmósfera, natural o antropógeno, que absorbe y emite radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja térmica emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera y por las nubes. Esta propiedad da lugar al efecto invernadero. El vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) son los gases de efecto invernadero primarios de la atmósfera terrestre. La atmósfera está compuesta, además, de cierto número de gases de efecto invernadero enteramente antropógenos, como los halocarbonos u otras sustancias que contienen cloro y bromo, contemplados en el Protocolo de Montreal. Además del CO₂, del N₂O y del CH₄, el Protocolo de Kioto contempla los gases de efecto invernadero hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) (IPCC, 2007).

Gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH). Planteamiento más extendido en el ámbito de la gestión de recursos hídricos que, sin embargo, no ha sido definido inequívocamente. La GIRH está basada en cuatro principios formulados por la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente, celebrada en Dublín en 1992: 1) el agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para el sostenimiento de la vida, el desarrollo y el medio ambiente; 2) el desarrollo y la gestión del agua deben estar planteados en términos participativos, incorporando de ese modo a usuarios, planificadores y responsables de políticas en todos los niveles; 3) las mujeres desempeñan un papel esencial en el abastecimiento, gestión y protección de los recursos hídricos; 4) el agua tiene un valor económico allí donde su uso suscite competencia y ha de reconocerse como un bien económico (IPCC, 2007).

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Órgano internacional de referencia que sintetiza y evalúa los conocimientos sobre el cambio climático. Establecido en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el IPCC evalúa toda la información sobre el cambio climático revisada por homólogos y publicada. Galardonado con el Premio Nobel de la Paz en 2007, el IPCC recurre a una red de científicos del clima, biólogos, economistas

y sociólogos, entre otros especialistas, de cada continente del planeta, para elaborar informes sobre el estado del conocimiento de la ciencia del cambio climático, analizar las repercusiones sociales y económicas del cambio climático e identificar las diferentes posibilidades de adaptación y mitigación (IPCC, 2007).

Hidrogeología, geohidrología, hidrología subterránea. Rama de la hidrología que estudia las aguas subterráneas y se basa en la geología y la mecánica de fluidos (WMO-Unesco, 2013).

Modelo climático. Representación numérica del sistema climático basada en las propiedades físicas, químicas y biológicas de sus componentes, en sus interacciones y en sus procesos de retroefecto, y que recoge todas o algunas de sus propiedades conocidas. El sistema climático se puede representar mediante modelos de diverso grado de complejidad; en otras palabras, para cada componente o conjunto de componentes es posible identificar un espectro o una jerarquía de modelos que difieren en aspectos como el número de dimensiones espaciales, el grado en que aparecen representados los procesos físicos, químicos o biológicos, o el grado de utilización de parametrizaciones empíricas. Los modelos de circulación general acoplados atmósfera-oceano-hielo marino (MCGAAO) proporcionan una de las más completas representaciones del sistema climático actualmente disponible. Se está evolucionando hacia modelos más complejos que incorporan química y biología interactivas. Los modelos climáticos se utilizan como herramienta de investigación para estudiar y simular el clima y para fines operacionales; en particular, para hacer predicciones climáticas mensuales, estacionales e interanuales (IPCC, 2007).

Potencial de calentamiento mundial (PCM). Índice basado en las propiedades radiativas de una mezcla homogénea de gases de efecto invernadero, que mide el forzamiento radiativo producido por la unidad de masa de un gas de efecto invernadero homogéneamente mezclado en la atmósfera actual, integrado a lo largo de determinado horizonte temporal, respecto del forzamiento por dióxido de carbono. El PCM representa el efecto combinado de los diferentes periodos de permanencia de esos gases en la atmósfera y su eficacia relativa de absorción de la radiación infrarroja saliente. El Protocolo de Kioto está basado en los PCM de los impulsos de emisión a lo largo de 100 años (IPCC, 2007).

Protocolo de Kioto. Fue adoptado en el tercer periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes (COP), en la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) de las Naciones Unidas, que se celebró en 1997 en la ciudad del mismo nombre. Consagra compromisos jurídicamente vinculantes, además de los señalados en la CMCC. Los países del Anexo B del Protocolo (la mayoría de los que pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, y de los que poseen una economía en transición) acordaron reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero antropógenos (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos y hexafluoruro de azufre) 5% como mínimo por debajo de los niveles de 1990 durante el periodo de compromiso de 2008 a 2012. El Protocolo de Kioto entró en vigor el 16 de febrero de 2005 (IPCC, 2007).

Proyección climática. Proyección de la respuesta del sistema climático a diversos escenarios de emisiones o de concentraciones de gases y aerosoles de efecto invernadero, o a escenarios de forzamiento radiativo, frecuentemente basada en simulaciones mediante modelos climáticos. La diferencia entre proyecciones climáticas y predicciones climáticas responde a la circunstancia de que las proyecciones climáticas dependen del escenario de emisiones-concentraciones-forzamiento radiativo utilizado, basado en supuestos relativos; por ejemplo, a un devenir socioeconómico y tecnológico que puede o no materializarse y que está sujeto, por consiguiente, a un grado de incertidumbre considerable (IPCC, 2007).

Resiliencia. Capacidad de un sistema social o ecológico para absorber una alteración sin perder su estructura básica, o sus modos de funcionamiento, ni su capacidad de autoorganización ni de adaptación al estrés y al cambio (IPCC, 2007).

Sensibilidad. Grado en que un sistema resulta afectado, positiva o negativamente, por la variabilidad o el cambio climático. Los efectos pueden ser directos (por ejemplo, un cambio en el rendimiento de los cultivos en respuesta a una variación de la temperatura media, de los intervalos de temperaturas o de la variabilidad de la temperatura) o indirectos (por ejemplo, daños causados por una mayor frecuencia de inundaciones costeras por haber aumentado el nivel del mar) (IPCC, 2007).

Sistema climático. Sistema complejo que consta de cinco componentes principales (atmósfera, hidrosfera, criosfera, superficie terrestre y biosfera) y de las interacciones entre ellos. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna y por efecto de forzamientos externos, como las erupciones volcánicas o las variaciones solares, y de forzamientos antropógenos, como el cambio de composición de la atmósfera o el cambio de uso de la tierra (IPCC, 2007).

Trayectoria de emisión. Proyección de la evolución a lo largo del tiempo de la emisión de un gas de efecto invernadero, o grupo de ellos, de sus precursores y de aerosoles (IPCC, 2007).

Trayectorias de concentración representativas. Para el quinto informe de evaluación del IPCC, la comunidad científica ha definido un conjunto de cuatro escenarios nuevos, denominados trayectorias de concentración representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Los cuatro escenarios de RCP comprenden un escenario de mitigación conducente a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2,6); dos escenarios de estabilización (RCP4,5 y RCP6,0), y un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero (RCP8,5). Por consiguiente, los escenarios de RCP pueden representar una variedad de políticas climáticas del siglo XXI, frente a los que se describen en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IEEE), que no contemplaban políticas climáticas, utilizados en el tercer y cuarto informe de evaluación (IPCC, 2013).

Variabilidad climática. Denota las variaciones del estado medio y otras características estadísticas (desviación típica, sucesos extremos, etcétera) del clima en todas las escalas espaciales y temporales más amplias que las de los fenómenos meteorológicos. La variabilidad puede deberse a procesos internos naturales del sistema climático (variabilidad interna) o a variaciones del forzamiento externo natural o antropógeno (variabilidad externa) (IPCC, 2007).

Vulnerabilidad. Grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático y, en particular, la variabilidad del clima y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad dependerá del carácter, la magnitud y la rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2007).

Bibliografía

- Ahedo, A. 6 de septiembre de 2017. "Desbordamiento de río provoca inundaciones en Glorieta de Vaqueritos". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/desbordamiento-de-río-provoca-inundaciones-en-glorieta-de-vaqueritos#imagen-1>>. Consultado en enero de 2018.
- Aldaz, P. 31 de agosto de 2017. "Calculan 28 colonias afectadas por lluvias". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/gobierno-calcula-28-colonias-y-140-vialidad-afectadas-en-cdmx-por-lluvias>>. Consultado en enero de 2018.
- _____. 7 de septiembre de 2017. "Lluvia dañó 400 casas, 300 vehículos y 26 colonias de la CDMX". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/lluvia-dano-400-casas-300-vehiculos-y-26-colonias-en-sur-de-la-cdmx#imagen-1>>. Consultado en enero de 2018.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. 1998. "Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements". En *FAO Irrigation and Drainage Paper 56*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Arredondo, J. C. 2007. *Adapting to Impacts of Climate Change on Water Supply in Mexico City*. Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World. Human Development Report 2007/2008. UNDP.
- Barange, M., Merino, G., Blanchard, J. L., Scholtens, J., Harle, J., Allison, E. H. y Jennings, S. 2014. "Impacts of Climate Change on Marine Ecosystem Production in Societies Dependent on Fisheries". En *Nature Climate Change*, 4(3), 211-216. <https://doi.org/10.1038/nclimate2119>
- Barrera, M. 5 de septiembre de 2017. "Hombre muere al ser arrastrado por la corriente en Tlalnepantla". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/edomex/hombre-muere-al-ser-arrastrado-por-la-corriente-en-tlalnepantla>>. Consultado en enero de 2018.

- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S. y Palutikof, J. P., eds. 2008. *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra: IPCC Secretariat.
- Birkle, P., Torres Rodríguez, V. y González Partida, E. 1998. "The Water Balance for the Basin of the Valley of Mexico and Implications for Future Water Consumption". En *Hydrogeology Journal*, 6(4), 500-517. <https://doi.org/10.1007/s100400050171>
- Bolognesi, T. 2015. "The Water Vulnerability of Metro and Megacities: An Investigation of Structural Determinants". En *Natural Resources Forum*, 39(2), 123-133. <https://doi.org/10.1111/1477-8947.12056>
- Boorman, D. y Sefton, C. 1997. "Recognizing the Uncertainty in the Quantification of the Effects of Climate Change on Hydrological Response". En *Climatic Change*, 35: 15-434.
- Campbell, B. M., Vermeulen, S. J., Aggarwal, P. K., Corner-Dolloff, C., Girvetz, E., Loboguerrero, A. M. y Wollenberg, E. 2016. "Reducing Risks to Food Security from Climate Change". En *Global Food Security*, 11: 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.06.002>
- Cannone, N., Diolaiuti, G., Guglielmin, M. y Smiraglia, C. 2008. "Accelerating Climate Change Impacts on Alpine Glacier Forefield Ecosystems in the European Alps". En *Ecological Applications*, 18(3), 637-648. <https://doi.org/10.1890/07-1188.1>
- CDESC-Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. 2002. *Observación general núm. 15. El derecho al agua* (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales). Naciones Unidas.
- CDMX. 2017. Boletín. *Reporte de la lluvia del 29 de mayo de 2017 en la CDMX*.
- CDMX-Ciudad de México. 2018. *Atlas público de peligros y riesgos de la Ciudad de México*.
- Cenapred-Centro Nacional de Prevención de Desastres. 2012. *Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos*. México: Segob.
- _____. 2014. *Sequías*. Serie de Fascículos. México: Segob.
- _____. 2015. *Impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2014* (resumen ejecutivo). México: Segob.
- Cepal-Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 2010. *Objetivos del Desarrollo del Milenio. Avances en la sostenibilidad ambiental*

- tal del desarrollo en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: Naciones Unidas.
- Chun, K. P., Wheeler, H. S. y Barr, A. G. 2014. "A Multivariate Comparison of the BERMS Flux-tower Climate Observations and Canadian Coupled Global Climate Model (CGCM3) Outputs". En *Journal of Hydrology*, 519: 1537-1550. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.08.059>
- Church, R. 2005. "A Groundwater Recharge Methodology for Water Framework Directive Initial Characterization in Scotland". En *Scottish Journal of Geology*, 41(1), 31-37. <https://doi.org/10.1144/sjg41010031>
- CICC-Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. 2012. *Adaptación al cambio climático en México: visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*. Semarnat, INECC.
- CIDE-Conagua. 2012. *Estimación de los factores y funciones de la demanda de agua potable en el sector doméstico en México*.
- CMM-Centro Mario Molina. 2014. *Programa de educación en cambio climático*. México.
- Cohen, B. 2006. "Urbanization in Developing Countries: Current Trends, Future Projections, and Key Challenges for Sustainability". En *Technology in Society*, 28(1-2), 63-80. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.10.005>
- Conagua-Comisión Nacional del Agua. 2015. *Strategic Projects: Drinking Water, Sewerage and Sanitation*. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/english07/publications/StrategicProjects.pdf>>.
- _____. 2008. *Programa Nacional Hídrico 2007-2012*. México: Gobierno de la República.
- _____. 2017. *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. México: Comisión Nacional del Agua.
- _____. 2018. *Estadísticas del agua en México*, edición 2018. México: Gobierno de la República.
- _____. 2013. *Programa Nacional Hídrico 2014-2018*. México: Gobierno de la República.
- Conagua-Semarnat. 2008. *Planta de tratamiento de aguas residuales Atonilco de Tula, estado de Hidalgo: memoria del proyecto*. México: Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento y Coordinación de Proyectos de Saneamiento del Valle de México.

- Consejo Consultivo de Cambio Climático. 2007. *Estrategia nacional de cambio climático*. México: Comisión Intersecretarial de Cambio Climático, Semarnat.
- Constantino, R. M. y Dávila, H. R. 2011. "Una aproximación a la vulnerabilidad y la resiliencia ante eventos hidrometeorológicos extremos en México". En *Política y Cultura*, otoño, núm. 36, pp. 15-44.
- CRED-Centre for Research on the Epidemiology of Disasters EM-DAT. 2018. *The OFDA/CRED International Disaster Database*. Bruselas: Catholic University of Leuven.
- CRU-Climatic Research Unit. 2017. *Global Temperature Record*. Disponible en: <<http://www.cru.uea.ac.uk>>. Consultado en enero de 2018.
- Dai, A. 2010. "Drought under Global Warming: A Review". En *Clim. Change* 2(1), 45-65. <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.81>
- Dinar, S., Katz, D., De Stefano, L. y Blankespoor, B. 2015. "Climate Change, Conflict, and Cooperation: Global Analysis of the Effectiveness of International River Treaties in Addressing Water Variability." En *Political Geography*, 45:55-66. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2014.08.003>
- DOF-Diario Oficial de la Federación. 2009. *Programa especial de cambio climático 2009-2012*. 28 de agosto. México
- _____. 2014. *Programa especial de cambio climático 2014-2018*. 28 de abril. México.
- _____. 2018. *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 4 de enero.
- Dore, M. H. I. 2005. "Climate Change and Changes in Global Precipitation Patterns: What do We Know?" En *Environment International*, 31(8), 1167-1181. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2005.03.004>
- Durazo, J. 1996. Ciudad de México. "Acuitardo superficial y contaminación acuífera". En *Ingeniería Hidráulica en México*, XI: 5-14.
- El País*. septiembre de 2017. "Lluvias paralizan Ciudad de México durante horas". Disponible en: <https://elpais.com/internacional/2017/08/31/mexico/1504189322_978073.html>. Consultado en enero de 2018.

- El Universal*. 7 de septiembre de 2017. "Lluvias no dan tregua en la Ciudad de México". Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/lluvias-no-dan-tregua-al-valle-de-mexico>>. Consultado en enero de 2018.
- Meyerson, E., Mo, K. C., Neelin, J. D., Nigam, S., Pan, Z., Ren, T., Ruiz-Barradas, A., Seager, R., Serra, Y. L., Seth, A., Sun, D.-Z., Thibeault, J. M., Stroeve, J. C., Wang, C., Xie, S.-P., Yang, Z., Yin, L., Yu, J.-Y., Zhang, T. y Zhao, M. 2014. "Regional Climate Processes and Projections for North America: CMIP3/CMIP5 Differences, Attribution and Outstanding Issues". En *NOAA Technical Report OAR CPO-2*. NOAA Climate Program Office, Silver Spring, MD. <http://dx.doi.org/10.7289/V5DB7ZRC>
- Enríquez-de-Salamanca, A., Díaz-Sierra, R., Martín-Aranda y Santos, M. 2017. "Environmental Impacts of Climate Change Adaptation". En *Environmental Impact Assessment Review*, 64: 87-96.
- Esteller, M. V. y Díaz-Delgado, C. 2002. "Environmental Effects of Aquifer Overexploitation: A Case Study in the Highlands of Mexico". En *Environmental Management*, 29(2), 266-278.
- Excélsior*. 28 de julio de 2016. "Tultitlán registra severa inundación luego de tormenta". Disponible en : <<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/07/28/1107772>>. Consultado en enero de 2018.
- Federman, D. K., Cortés, F. I. A. y Pérez, M. L. 2014. "Constructing a Framework for National Drought Policy: The Way Forward in Mexico". En *Weather and Climate Extremes*, 3: 90-94. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.04.003>
- Forsyth, T. 2013. "Community-based Adaptation: A Review of Past and Future Challenges: Community-based Adaptation". En *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 4(5), 439-446. <https://doi.org/10.1002/wcc.231>
- Gaillard, J. C., Liamzon, C. y Maceda, E. 2005. "Act of Nature or Act of Man? Tracking the Root Causes of Increasing Disasters in the Philippines". En *Philippine Geographical Journal*, 49: 45-66.
- Galindo, L. M. (2009). *La economía del cambio climático*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

- GDF, SMA, SOS y SACM. 2007. *Programa de Manejo Sustentable del Agua para la Ciudad de México*. Disponible en: <http://www.sma.df.gob.mx/dgpcp/pdf/ProgAgua_Cd>. Consultado en enero de 2018.
- GDF-Gobierno del Distrito Federal. 2014. "Resolución de carácter general mediante la cual se determinan y se dan a conocer las zonas en las que los contribuyentes de los derechos por el suministro de agua en sistema medido, de uso doméstico o mixto, reciben el servicio por tandeo". En *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, 28 de marzo. Disponible en: <http://www.finanzas.df.gob.mx/transparencia/14/I/otros/2014/resol_zonas_der_sumi_agua.pdf>. Consultado en enero de 2018.
- Gibbons, D. C. 1986. "The Economic Value of Water". En *Resources for the Future*. Washington.
- Gómez, J. D., Etchevers, J. D., Monterroso, A. I., Gay, C., Campo, J. y Martínez, M. 2008. "Spatial Estimation of Mean Temperature and Precipitation in Areas of Scarce Meteorological Information". En *Atmósfera*, 21: 35-56.
- González-Morán, T., Rodríguez, R. y Cortés, S. A. 1999. "The Basin of Mexico and its Metropolitan Area: Water Abstraction and Related Environmental Problems". En *Journal of South American Earth Sciences*, 12(6), 607-613. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(99\)00043-7](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(99)00043-7)
- Grindley, J. 1967. "The Estimation of Soil Moisture Deficits". En *The Meteorological Magazine*. Met.O.785.
- _____. 1969. *The Calculation of Actual Evaporation and Soil Moisture Deficits over Specified Catchment Areas*. Memoir No. 38. Meteorological Office. Bracknell.
- Guevara Sanginés, A., Soto Montes de Oca, G. y Lara Pulido, J. A. 2010. "Pobreza". En Blanca Jiménez, María Luisa Torregrosa y Luis Aboites Aguilar, eds. *El agua en México: cauces y encauces*. México: Academia Mexicana de Ciencias y Comisión Nacional del Agua.
- Guha-Sapir, D., Hoyois, Ph., Wallemacq, P. y Below, R. 2016. *Annual Disaster Statistical Review 2016: The Numbers and Trends*. Bruselas.
- Gustafsson, M. 2016. "How do Development Organisations Integrate Climate and Conflict Risks? Experiences and Lessons Learnt from The UK, Germany and The Netherlands". En *Research Report*. Stockholms University. Disponible en: <http://www.statsvet.su.se/polopoly_fs

- /1.282384.1463143383!/menu/standard/file/How%20do%20Development%20Organisations%20Integrate%20Climate%20and%20Conflict%20Risks.pdf>. Consultado en enero de 2018.
- Haddeland, I., Heinke, J., Biemans, H., Eisner, S., Flörke, M., Hanasaki, N. y Wisser, D. (2014). "Global Water Resources Affected by Human Interventions and Climate Change". En *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3251-3256. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222475110>
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. 1982. "Estimation of Potential Evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Division". En *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 108: 223-230.
- Hein, L., Metzger, M. J. y Leemans, R. 2009. "The Local Impacts of Climate Change in the Ferlo, Western Sahel". En *Climatic Change*, 93(3-4), 465-483. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9500-3>
- Henstra, D. 2016. "The Tools of Climate Adaptation Policy: Analysing Instruments and Instrument Selection". En *Climate Policy*, 16(4), 496-521. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1015946>
- Hernández, S. 2 de junio de 2016. "Suman casi 7 mil afectados en Iztapalapa por lluvias". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2016/06/2/suman-casi-7-mil-afectados-por-lluvias-en-iztapalapa>>. Consultado en enero de 2018.
- Herrera-Pantoja, M. y Hiscock, K. M. 2008. "The Effects of Climate Change on Potential Groundwater Recharge in Great Britain". En *Hydrological Processes*, 22(1), 73-86. <https://doi.org/10.1002/hyp.6620>
- _____. 2015. "Projected Impacts of Climate Change on Water Availability Indicators in a Semi-arid Region of Central Mexico". En *Environmental Science & Policy*, 54: 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.020>
- Hess, T. 1996. "Evapotranspiration Estimates for Water Balance Scheduling in the UK". En *Irrigation New*, 25: 31-36.
- Hiscock, K. M. y Bense, V. F. 2014. *Hydrogeology: Principles and Practice* (2ª ed.). Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Inc.
- Howard, K. W. F. y Lloyd, J. W. 1979. "The Sensitivity of Parameters in the Penman Evaporation Equations and Direct Recharge balance". En *Journal of Hydrology*, 41(3-4), 329-344. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(79\)90069-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(79)90069-6)

- Howlett, M. 2009. "Governance Modes, Policy Regimes and Operational Plans: A Multi-level Nested Model of Policy Instrument Choice and Policy Design". En *Policy Sciences*, 42(1), 73-89. <https://doi.org/10.1007/s11077-009-9079-1>
- Hughes, L. 2003. "Climate Change and Australia: Trends, Projections and Impacts". En *Austral Ecology*, 28(4), 423-443.
- IMCO-Instituto Mexicano para la Competitividad. 2014. *Guía para la creación de organismos metropolitanos de agua potable y saneamiento en México*. México.
- IMTA-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2012. *Metodología de evaluación de costos de adaptación al cambio climático en Organismos Operadores de Agua (Oopas)*. Morelos, México.
- Inegi. 1988. *Atlas nacional del medio físico*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 1989. *Cartas edafológicas*, escala 1: 50 000. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 1991. *X Censo de población. Resultados definitivos*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 2000. *Carta edafológica*, escala 1: 250 000. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 2001. *X Censo de Población. Resultados definitivos*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 2002. *Estadísticas del medio ambiente del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 2003. *Cartografía geoestadística urbana*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- _____. 2010. Base de datos del Censo de Población y Vivienda 2010. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- _____. 2014. Cuaderno estadístico y geográfico de la zona metropolitana del Valle de México 2014. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- _____. 2014a. *Censos económicos 2014. Cuestionario de Organismos Operadores de Agua*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Impacts Adaptation and Vulnerability. Summary for Policymakers*. The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press.
- _____. 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report Summary for Policymakers. Assessment of Working Groups I, II and III to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- _____. 2013. "Resumen para responsables de políticas". En *Cambio climático 2013: bases físicas. Contribución del grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P. M., eds.]. Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- _____. (2014). *Climate Change 2014. Synthesis Report, Summary for Policy-makers*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jansen, A. y Schulz, C. (2006). "Water Demand and the Urban Poor: A Study of the Factors Influencing Water Consumption among Households in Cape Town, South Africa". En *South African Journal of Economics*, 74: 11.
- Jáuregui, E. 2000. *El clima de la Ciudad de México*. México: Plaza y Valdés.
- Jha, A. K., Bloch, R. y Lamond, J. 2012. *Cities and Flooding: A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*. Washington: World Bank.
- Jian-Ping, Y., Yong-Jian, Di., Shi-Yin, L. y Chun-Ping, T. 2015. "Vulnerability of Mountain Glaciers in China to Climate Change". En *Advances in Climate Change Research*, 6: 171-180.
- Jiménez Cisneros, B., Torregrosa y Armentia, M. L. y Aboites Aguilar, L. 2010. *El agua en México: cauces y encauces*. México: Academia Mexicana de Ciencias / Consejo Nacional del Agua (Conagua).
- Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. y M. Wehner, 2013. "Changes in Temperature and Precipitation Extremes in the CMIP5 Ensemble". En *Climatic Change*, 119: 345-357. <http://dx.doi.org/10.1007/s10584-013-0705-8>

- Kharraz, J. E., El-Sadek, A., Ghaffour, N. y Mino, E. 2012. "Water Scarcity and Drought in WANA Countries". En *Procedia Engineering*, 33: 14-29. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1172>
- Knutti, R. y Sedláček, J. 2013. "Robustness and Uncertainties in the New CMIP5 Climate Model Projections". En *Nature Climate Change*, 3: 369-373. <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1716>
- Knutti, R., Sedláček, J., Sanderson, B. M., Lorenz, R., Fischer E. M. y Eyring V. 2017. "A Climate Model Projection Weighting Scheme Accounting for Performance and Interdependence". En *Geophysical Research Letters*, 44: 1909-1918. <http://dx.doi.org/10.1002/2016GL0720>
- Komives, K., Foster, V., Halpern, J. y Wodon, Q., con ayuda de Abdullah, R., 2005. *Water, Electricity and the Poor-who Benefits from Utility Subsidies?* Washington: World Bank.
- Korenfeld, F. D., Arreguín, F. I. y López, M. 2014. "Constructing a Framework for National Drought Policy: The Way Forward in Mexico". En *Weather and Climate Extremes*, 3: 90-94.
- Kotamarthi, R., Mearns, L., Hayhoe, K., Castro, C. y Wuebble, D. 2016. "Use of Climate Information for Decision-making and Impact Research". En *U. S. Department of Defense, Strategic Environment Research and Development Program Report*. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1986.0085>
- Kröger, H., Donner, I. y Skiello, G. 1975. "Influence of a New Virostatic Compound on the Induction of Enzymes in Rat Liver". En *Arzneimittel-Forschung*, 25(9), 1426-1429.
- Kumar, D., Kodra, E. y Ganguly, A. R. 2014. "Regional and Seasonal Inter-comparison of CMIP3 and CMIP5 Climate Model Ensembles for Temperature and Precipitation". En *Climate Dynamics*, 43:2491-2518. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-014-2070-3>
- Landa, R., Magaña V. y Neri, C. 2008. *Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales / Servicios y Publicaciones Grande.
- Le Blanc, A. 2007. *Framework for Analyzing Tariffs and Subsidies in Water Provision to Urban Households in Developing Countries*. Division for Sustainable Development. Nueva York: Organización de las Naciones Unidas.

- Lecocq, F. y Shalizi, Z. 2007. *Balancing Expenditures on Mitigation of and Adaptation to Climate Change: An Exploration of Issues Relevant to Developing Countries*. Washington: World Bank, Development Research Group-Sustainable Rural and Urban Development Team.
- Leonard, M., Petropavlovskikh, I., Lin, M., McClure-Begley, A., Johnson, B. J., Oltmans, S. J. y Tarasick, D. 2017. "An Assessment of 10-year NOAA Aircraft-based Tropospheric Ozone Profiling in Colorado". En *Atmospheric Environment*, 158: 116-127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.03.013>
- Loáiciga, H. A. 2003. "Climate Change and Ground Water". En *Annals of the Association of American Geographers*, 93(1), 30-41. <https://doi.org/10.1111/1467-8306.93103>
- López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P. y Nicolas, J.-M. 2009. "Time Series Analysis of Mexico City Subsidence Constrained by Radar Interferometry". En *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2009.02.006>
- Luege-Tamargo, J. L. 2011. *Climate Change and Flooding in the Valley of México*. Disponible en: <<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/EL%20CAMBIOS%20CLIM%3%81TICO%20Y%20LAS%20LAS%20%20INUNDACIONES%20EN%20EL%20M%C3%89XICO.pdf>>. Consultado en diciembre de 2015.
- Lugo, H. J. 1984. *Geomorfología del sur de la cuenca de México*. México: Instituto de Geografía-UNAM.
- Maréchal, J.-C., Varma, M. R. R., Riotte, J., Vouillamoz, J.-M., Kumar, M. S. M., Ruiz, L. y Braun, J.-J. 2009. "Indirect and Direct Recharges in a Tropical Forested Watershed: Mule Hole, India". En *Journal of Hydrology*, 364(3-4), 272-284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.006>
- Martínez, P. y Aguilar, A. 2008. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, II. México.
- McPhearson, T., Andersson, E., Elmqvist, T. y Frantzeskaki, N. 2015. "Resilience of and Through Urban Ecosystem Services". En *Ecosystem Services*, 12: 152-156. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2014.07.012>
- McSweeney, C. F. y Jones, R. G. 2016. "How Representative is the Spread of Climate Projections from the 5 CMIP5 GCMs Used in ISI-MIP?" En *Climate Services*, 1: 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.02.001>

- Mendoza, V., Villanueva, E. y Adem, J. 1997. "Vulnerability of Basins and Watersheds in Mexico to Global Climate Change". En *Climate Research*, 9: 139-145. <https://doi.org/10.3354/cr009139>
- Miller, K. y Yates, D. 2005. *Climate Change and Water Resources: A Primer for Municipal Water Providers*. EUA: National Center for Atmospheric Research and Awwa Research Foundation.
- Mishra, S. K. y Singh, V. P. 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN)*. Washington: Methodology Water Science and Technology Library.
- Mooser, H. F. 1988. "Geología de la cuenca de México". En *Atlas de la Ciudad de México*, 2: 23-26.
- Mooser, H. F. y Molina, C. 1993. "Nuevo modelo hidrogeológico para la cuenca de México". En *Revista del Centro de la Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra, A. C.*
- Nahar, J., Johnson, F. y Sharma, A. 2017. "Assessing the Extent of Non-stationary Biases in GCMs". En *Journal of Hydrology*, 549: 148-162. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.045>
- NASA/GISS. 2018. *Global Land-ocean Temperature Index*. NASA's Goddard Institute for Space Studies (GISS). Disponible en: <<https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>>.
- Okpara, U. T., Stringer, L. C. y Dougill, A. J. 2018. "Integrating Climate Adaptation, Water Governance and Conflict Management Policies in Lake Liparian Zones: Insights from African Drylands". En *Environmental Science & Policy*, 79: 36-44. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.002>
- Olmstead, S. M., Hanemann, M. W. y Stavins, R. N. 2007. "Water Demand under Alternative Price Structures". En *Journal of Environmental Economics and Management* 54: 181-198. <http://dx.doi.org/10.3386/w13573>
- OMM-Organización Meteorológica Mundial. 2017. *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero*, núm. 13.
- ONU. 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Organización de las Naciones Unidas.
- OPMAC-Overseas Project Management Consultants y Ecofin Consultores. 2000. *Estudio para la recarga del acuífero en el suelo de conservación del Distrito Federal*. Banco Interamericano de Desarrollo / GDF.

- Ortega-Guerrero, A., Cherry, J. A. y Rudolph, D. L. 1993. "Large-scale Aquitard Consolidation Near Mexico City". En *Ground Water*, 31(5), 708-718. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1993.tb00841.x>
- Ortiz, V. B. y Ortiz, S. C. A. 1990. *Edafología*. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- Pavón, A. 29 de mayo de 2017. "Deja tormenta inundaciones en Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco". Disponible en: <<https://www.sdpnoticias.com/local/ciudad-de-mexico/2017/05/29/deja-tormenta-inundaciones-en-coyoacan-tlalpan-y-xochimilco>>. Consultado en enero de 2018.
- Pearce-Higgins, J. W., Beale, C. M., Oliver, T. H., August, T. A y Crick, H. Q. P. 2017. "A National-scale Assessment of Climate Change Impacts on Species: Assessing the Balance of Risks and Opportunities for Multiple Taxa". En *Ecological Informatics*, 43: 116-123.
- Penman, H. L. 1948. "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass". En *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 193:120-145.
- _____. 1950. The Water Balance of the Stour Catchment Area. En *Journal of the Institution of Water Engineering*, 4: 457-469.
- Peralta, O. 2008. *Cambio climático y seguridad nacional*. México: Cámara de Diputados.
- Perreault, T. 2014. "What Kind of Governance for What Kind of Equity? Towards a Theorization of Justice in Water Governance". En *Water International*, 39(2), 233-245. <https://doi.org/10.1080/02508060.2014.886843>
- PIGOO. 2017. *Programa de Indicadores de Gestión de Organismos Operadores*. Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- PNUMA. 2007. GEO 4. *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente*.
- Presidencia de la República. 2017. "CDMX: Inaugura el presidente Enrique Peña Nieto el Sistema de Pozos Profundos que dotará de más agua potable a la Ciudad de México". México. 27 de octubre.
- Priestley, C. H. B. y Taylor, R. J. 1972. "On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-scale Parameters". En *Monthly*

- Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2)
- Proceso. 2009. "Cortes de agua, confrontan al GDF y la Conagua". 7 de abril. Disponible en: <<http://www.proceso.com.mx/114211/cortes-de-agua-confrontan-al-gdf-y-la-conagua>>. Consultado en enero de 2018.
- Publimetro. 2016. "Inundaciones dañan 200 viviendas en Iztapalapa", 1º de julio.
- Renzetti, S. 2002. *The Economics of Water Demand*. Boston: Kluwer Academic Publisher.
- Reshmidevi, T. V., Nagesh Kumar, D., Mehrotra, R. y Sharma, A. (2018). "Estimation of the Climate Change Impact on a Catchment Water Balance Using an Ensemble of GCMs". En *Journal of Hydrology*, 556: 1192-1204. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.016>
- Reuveny, R. 2007. "Climate Change-induced Migration and Violent Conflict". En *Political Geography*, 26(6), 656-673. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2007.05.001>
- Rohli, R. V. y Vega, A. J. 2018. *Climatology* (4ª ed.). Burlington, Massachusetts: Jones & Bartlett Learning.
- Romero Sánchez, G. 2 de junio de 2017. "Asegurado, el pago de daños por inundaciones, afirma Mancera". En *La Jornada*, p. 30.
- Roy, S. B., Chen, L., Girvetz, E. H., Maurer, E. P., Mills, W. B. y Grieb, T. M. 2012. "Projecting Water Withdrawal and Supply for Future Decades in the U. S. under Climate Change Scenarios". En *Environmental Science & Technology*, 46(5), 2545-2556. <https://doi.org/10.1021/es2030774>
- Ruiz-Palacios, F. y R. Jiménez 25 de julio de 2016. "Lluvias dejan inundaciones en CDMX y Cuautitlán Izcalli". En *El Universal*. Disponible en: <<http://www.eluniversal.com.mx/articulo/metropoli/cdmx/2016/07/25/lluvias-dejan-inundaciones-en-cdmx-y-cuatitlan-izcalli>>. Consultado en enero de 2018.
- SACM. 2008. *Volumen anual de agua entregada de fuentes locales y federales*. México: Dirección de Sectorización y Automatización, Sistema de Aguas de la Ciudad de México.
- _____. 2012. *Programa de gestión integral de los recursos hídricos, visión 20 años*. México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.

- SACM. 2012a. *El gran reto del agua en la Ciudad de México. Pasado, presente y perspectivas de solución para una de las ciudades más complejas del mundo*. México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.
- SACM-IMTA. 2006a. *Estudio para obtener la disponibilidad del acuífero de la ZMCM*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.
- _____. 2006b. *Modelo hidrodinámico del acuífero de la ZMCM*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.
- _____. 2006c. *Medición de los niveles estáticos de pozos piloto en el valle de México*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Sistema de Aguas de la Ciudad de México, Gobierno del Distrito Federal.
- SADS. 2015. *Inundaciones urbanas y cambio climático. Recomendaciones para la gestión*. Buenos Aires: Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable.
- Sánchez, L. F. y Gutiérrez, C. 1997. *Overexploitation Effects of the Aquifer System of Mexico City. Problems, Processes and Management*, 1.
- Sanderson, B. M., Knutti, R. y Caldwell, P. 2015. "A Representative Democracy to Reduce Interdependency in a Multimodel Ensemble". En *Journal of Climate*, 28: 5171-5194. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00362.1>
- Sheffield, J., Barrett, A., Barrie, D., Camargo, S. J., Chang, E. K. M., Colle, B., Fernando, D. N., Fu, R., Geil, K. L., Hu, Q., Jiang, X., Johnson, N., Karlsruhas, K. B., Kim, S. T., Kinter, J., Kumar, S., Langenbrunner, B., Lombardo, K., Long, L. N., Maloney, E., Mariotti, A., Lauer, J., A. y Hamilton, K. 2013. "Simulating Clouds with Global Climate Models: A Comparison of CMIP5 Results with CMIP3 and Satellite Data". En *Journal of Climate*, 26: 3823-3845. <http://dx.doi.org/10.1175/jcli-d-12-00451.1>
- Scheffran, J., Ide, T. y Schilling, J. 2014. "Violent Climate or Climate of Violence? Concepts and Relations with Focus on Kenya and Sudan". En *The International Journal of Human Rights*, 18(3), 369-390. <https://doi.org/10.1080/13642987.2014.914722>

- Segob. 2001. *Programa especial de prevención y mitigación de riesgos de desastres 2001-2006*. México: Secretaría de Gobernación.
- Semarnat. 2003. *Acuerdo por el que se dan a conocer los límites de 188 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, los resultados de los estudios realizados para determinar su disponibilidad media anual de agua y sus planos de localización*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. *Diario Oficial de la Federación*. 31 de enero.
- Shen, M., Chen, J., Zhuan, M., Chen, H., Xu, C.-Y. y Xiong, L. 2018. "Estimating Uncertainty and its Temporal Variation Related to Global Climate Models in Quantifying Climate Change Impacts on Hydrology". En *Journal of Hydrology*, 556: 10-24. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.11.004>
- Singh, B., Ramasubban, R., Bhatia, R., Briscoe, J., Griffin, C. C. y Kim, C. 1993. "Rural Water Supply in Kerala, India: How to Emerge from a Low-level Equilibrium Trap". En *Water Resources Research*, 29(7), 1931-1942. <https://doi.org/10.1029/92WR02996>
- SMADS-Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable. 2015. *Inundaciones urbanas y cambio climático. Recomendaciones para la gestión*. Buenos Aires, Argentina.
- Smith, A. B. y Katz, R. W. (2013). "US Billion-dollar Weather and Climate Disasters: Data Sources, Trends, Accuracy and Biases". En *Natural Hazards*, 67(2), 387-410. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0566-5>
- Soto Montes de Oca, G. 2007. *Agua: tarifas, escasez y sustentabilidad en las megaciudades. ¿Cuánto están dispuestos a pagar los habitantes de la Ciudad de México?* México: Sistema de Aguas de la Ciudad de México / Universidad Iberoamericana / Centro de Estudios Jurídicos y Ambientales / Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal.
- _____. 2008. *Diagnóstico sobre la situación del riesgo y vulnerabilidad de los habitantes de la Ciudad de México al no contar con el servicio de agua potable, como base para el análisis del derecho humano al agua y los derechos colectivos de los habitantes*. México: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la Ciudad de México.

- Soto Montes de Oca, G. 2015. "Tarifas y derecho humano al agua". En *Defensor. Revista de Derechos Humanos*. Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal. Núm. 7, año XIII, julio. Disponible en: <http://cdhdfbeta.cdhdf.org.mx/wp-content/uploads/2015/10/DFensor_07_2015b.pdf>.
- Soto-Montes de Oca, G. y Herrera-Pantoja M. 2016. "Implications of Climate Change on Water Resource Management in Megacities in Developing Countries: Mexico City Case Study". En *Environmental Management and Sustainable Development*, 5: 1. doi.10.5296/emsd.v5i1.8807.
- Stern, N. 2006. *Stern Review: The Economics of Climate Change*. Londres: HM Treasury. Disponible en: <http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm>.
- Stouffer, R. J., Manabe, S. y Vinnikov, K. Y. 1994. "Model Assessment of the Role of Natural Variability in Recent Global Warming". En *Nature*, 367: 634-636.
- Stratus Consulting, Inc. 2004. *Adaptación al cambio climático: Hermosillo, Sonora, un caso de estudio*. México: Universidad Nacional Autónoma de México/El Colegio de Sonora.
- Sun, L., K. E. Kunkel, Stevens, L. E., Buddenberg, A., Dobson, J. G. y Easterling, D. R. 2015. "Regional Surface Climate Conditions in CMIP3 and CMIP5 for the United States: Differences, Similarities, and Implications for the U. S." En *National Climate Assessment. NOAA Technical Report NESDIS 144*. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service. <http://dx.doi.org/10.7289/V5RB72KG>
- Sweet, S. K., Wolfe, D. W., DeGaetano, A. y Benner, R. 2017. "Anatomy of the 2016 Drought in the Northeastern United States: Implications for Agriculture and Water Resources in Humid Climates". En *Agricultural and Forest Meteorology*, 247: 571-581. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.024>
- Swilling, M. y Annecke, E. 2012. *Just Transitions: Explorations of Sustainability in an Unfair World*. Claremont, Sudáfrica; Tokio, Japón: UCT Press; publicado en Norteamérica, Europa y Asia por United Nations University Press.

- Thrasher, B., Xiong, J., Wang, W., Melton, F., Michaelis, A. y Nemani, R. 2013. "Downscaled Climate Projections Suitable for Resource Management". En *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, 94: 321-323. <http://dx.doi.org/10.1002/2013EO370002>
- Thorntwaite, C. W. y Mather, J. R. 1955. *The Water Balance*. Nueva Jersey: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.
- Turner, J., Connolley, W. M., Lachlan-Cope, T. A. y Marshall, G. J. 2006. "The Performance of the Hadley Centre Climate Model (HadCM3) in High Southern Latitudes". En *International Journal of Climatology*, 26(1), 91-112. <https://doi.org/10.1002/joc.1260>
- US-EPA-U. S. Environmental Protection Agency. 2011. *Climate Change Vulnerability Assessments: Four Case Studies of Water Utility Practices*. Washington: Global Change Research Program, National Center for Environmental Assessment: EPA/600/R-10/077F. Disponible en: <<http://www.epa.gov/ncea>>.
- UNDP, ed. 2007. *Fighting Climate Change: Human Solidarity in a Divided World*. Houndmills: Palgrave Macmillan.
- United Nations. 2003. *Water for People, Water for Life: A Joint Report by the Twenty Three UN Agencies Concerned with Freshwater*. Nueva York: Unesco, Pub. Berghahn Books.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs & Population Division (2016). *The World's Cities in 2016: Data Booklet*. New York, NY? United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- United Nations Human Settlements Programme, ed. (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*, Washington: Earthscan.
- UN-Habitat. 2008. *State of the World's Cities 2010/11. Bridging the Urban Divide*. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat) & Earthscan Publishing.
- UN-United Nations. 2012. *World Urbanization Prospects: The 2011 Revision*. Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- Van der Velde, M., Tubiello, F. N., Vrieling, A. y Bouraoui, F. 2012. "Impacts of Extreme Weather on Wheat and Maize in France: Evaluating Regional Crop Simulations Against Observed Data". En *Climatic*

- Change*, 113(3-4), 751-765. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0368-2>
- Velasco, M. 23 de agosto de 2016. "Reportan inundaciones de hasta 60 centímetros en Ecatepec". En *Excélsior*. Disponible en: <<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/08/23/1112762>>. Consultado en enero de 2018.
- _____. 28 de agosto de 2016. "Lluvia deja afectaciones en avenidas y vivienda del Estado de México". En *Excélsior*. Disponible en: <<http://www.excelsior.com.mx/comunidad/2016/09/28/1119592>>. Consultado en enero de 2018.
- Vij, S., Moors, E., Ahmad, B., Arfanuzzaman, M., Bhadwal, S., Biesbroek, R. y Wester, P. 2017. "Climate Adaptation Approaches and Key Policy Characteristics: Cases from South Asia". En *Environmental Science & Policy*, 78: 58-65. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.09.007>
- Vija, S., Biesbroeka, R., Grootb, A. y Termeera, K. 2018. "Changing Climate Policy Paradigms in Bangladesh and Nepal". En *Environmental Science and Policy*. 81: 77-85.
- Vivekananda, J., Schilling, J. y Smith, D. 2014. "Understanding Resilience in Climate Change and Conflict Affected Regions of Nepal". En *Geopolitics*, 19(4), 911-936. <https://doi.org/10.1080/14650045.2014.964863>
- Warren, C. J. y Rudolph, D. L. 1997. "Clay Minerals in Basin of Mexico Lacustrine Sediments and their Influence on Ion Mobility in Groundwater". En *Journal of Contaminant Hydrology*, 27(3-4), 177-198. [https://doi.org/10.1016/S0169-7722\(96\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0169-7722(96)00100-3)
- Wheater, H., Sorooshian, S. y Sharma, K. D., eds. 2007. *Hydrological Modelling in Arid and Semi-arid Areas*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535734>
- Wheeler, T. y Von Braun, J. 2013. "Climate Change Impacts on Global Food Security". En *Science*, 341(6145), 508-513. <https://doi.org/10.1126/science.1239402>
- Whittington, D., Hanemann, W. M., Sadoff, C. y Jeuland, M., 2009. "The Challenge of Improving Water and Sanitation Services in Less Developed Countries". En *Foundations and Trends in Microeconomics*, 4 (6-7): 469-609.

- Williams, J. E., Isaak, D. J., Imhof, J., Hendrickson, D. A. y McMillan, J. R. 2018. "Cold-water Fishes and Climate Change in North America". En *Encyclopedia of the Anthropocene*. 2: 103-111.
- WMO. 2002. *World Meteorological Organization Statement on the Status of Global Climate in 2002*. Ginebra: World Meteorological Organization.
- World Meteorological Organization y Unesco. 2013. *International Glossary of Hydrology = Glossaire International D'hydrologie = Mezhdunarodnyĭ gidrologicheskiĭ slovar' = Glosario hidrológico internacional*. Disponible en: <https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_385-2012.pdf>.
- Woldemeskel, F. M., Sharma, A., Sivakumar, B. y Mehrotra, R. 2014. "A Framework to Quantify GCM Uncertainties for Use in Impact Assessment Studies". En *Journal of Hydrology*, 519: 1453-1465. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.025>
- WB-World Bank. 2008. *Climate Resilient Cities: A Primer on Reducing Vulnerabilities to Climate Change Impacts and Strengthening Disaster Risk Management in East Asian cities*. Disponible en: <www.worldbank.org/eap/climatecities>.
- _____. 2013. *Urban Water in the Valley of Mexico: A Green Path for Tomorrow?* Washington.
- World Meteorological Organization y Unesco. 2013. *International Glossary of Hydrology*.
- Worthington, A. C. y Hofman, M. 2007. *A State of the Art Review of Residential Water Demand Modelling*. Research Online. Faculty of Business-Account & Finance, Working Papers.
- Worthington, A. C., Higgs, H. y Hoffmann, M. 2009. "Residential Water Demand Modeling in Queensland, Australia: A Comparative Panel Data Approach". En *Water Policy*, 11(4), 427. <https://doi.org/10.2166/wp.2009.063>
- Yang, J.-P., Ding, Y.-J., Liu, S.-Y. y Tan, C.-P. 2015. "Vulnerability of Mountain Glaciers in China to Climate Change". En *Advances in Climate Change Research*, 6(3-4), 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.11.003>
- Yoo, J., Simonit, S., Kinzig, A. P. y Perrings, C. 2014. "Estimating the Price Elasticity of Residential Water Demand: The Case of Phoenix, Arizona". En *Applied Economic Perspectives and Policy*, 36(2), 333-350. <https://doi.org/10.1093/aep/ppt054>

- Yusoff, I., Hiscock, K. M. y Conway, D. 2002. "Simulation of the Impacts of Climate Change on Groundwater Resources in Eastern England". En *Geological Society*, Londres, Special Publications, 193(1), 325-344. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2002.193.01.24>
- Zabcik, B. 2017. "Harvey Shows Why Houston Must Use Green Infrastructure". En *Environmental Texas. News Release*. 24 de septiembre.
- Zhang, H. H. y Brown, D. F. 2005. "Understanding Urban Residential Water use in Beijing and Tianjin, China". En *Habitat International*, 29(3), 469-491. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2004.04.002>
- Zhang, X.-C., Liu, W.-Z., Li, Z. y Chen, J. 2011. "Trend and Uncertainty Analysis of Simulated Climate Change Impacts with Multiple GCMs and Emission Scenarios". En *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(10), 1297-1304. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.05.010>



Cambio climático y agua en ciudades: impactos en la Ciudad de México. Aspectos científicos y políticas públicas se terminó de imprimir en noviembre de 2019, en los talleres de Ingramex, calle Centeno 195, col. Valle del Sur, Alcaldía Iztapalapa, 09819, Ciudad de México.

La edición estuvo al cuidado del área de publicaciones de la UAM Cuajimalpa-Rectoría. Aura González hizo la corrección de estilo; Rosario Avilés, el diseño y la formación; Úrsula Treviño, la asistencia editorial. El tiraje fue de 500 ejemplares.

El cambio climático plantea múltiples retos a la gestión del agua en las ciudades, con impactos inciertos en el bienestar y la seguridad de millones de personas, así como en el desarrollo de regiones enteras. Es fundamental llevar a cabo ajustes en las políticas públicas para mejorar la resiliencia de las zonas urbanas hacia los riesgos inminentes de este fenómeno. Las autoras abordan el estado del arte sobre la relación entre el cambio climático y el agua en las ciudades, en capítulos que pueden leerse de manera individual o integrada. El libro explora temas como:

- Los impactos esperados del cambio climático en el ciclo hidrológico.
- Los problemas de sustentabilidad en la gestión del agua en las zonas urbanas de México y particularmente de la Ciudad de México.
- Metodología para investigar los posibles impactos del cambio climático en la disponibilidad de agua y el riesgo de inundaciones.
- La importancia de desarrollar políticas de adaptación bajo contextos de incertidumbre, para potenciar la resiliencia y disminuir la vulnerabilidad.
- Simulaciones climáticas para la Ciudad de México y los retos que suponen.

El libro busca ser una herramienta para estudiantes, funcionarios y profesionistas en sus actividades relativas al manejo del agua y el cambio climático.