



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES



**EVALUACIÓN DE LA AFECTACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA
EN CUERPOS DE AGUA SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEOS
POR EFECTO DE LA VARIABILIDAD Y EL CAMBIO CLIMÁTICO
Y SU IMPACTO EN LA BIODIVERSIDAD, AGRICULTURA,
SALUD, TURISMO E INDUSTRIA**

Informe Final
Octubre 2008

RESPONSABLE DE PROYECTO:
DRA. MA. TERESA LEAL ASCENCIO

Participantes:
Ma. Teresa Leal Ascencio
Dalia Vanessa Millán Gómez
Claudia G. Méndez Jaime
Carl A. Servín Jungdorf

Revisores:
Dr. Saúl Miranda Alonso
Dra. Ma. Teresa Alarcón Herrera
Dra. Blanca Jiménez Cisneros

Hoja dejada en blanco

RESUMEN EJECUTIVO

El sector hídrico es considerado uno de los más vulnerables al cambio climático, pues será propenso a alcanzar una situación de amenaza para la provisión de agua en muchos de los países menos desarrollados del mundo, en particular para millones de los hogares en situación de pobreza.

En este estudio se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva para identificar los impactos posibles en la calidad del agua, como resultado de varios factores, de los cuales algunos de los más representativos son:

En el caso de una disminución en la precipitación, se prevén impactos por la reducción en la dilución de los contaminantes provenientes de descargas puntuales (por reducción del flujo de los ríos), pérdida en la capacidad de disolución de oxígeno en el agua (por reducción de la turbulencia e incremento de la temperatura), así como incremento en la temperatura del agua (por incremento de la temperatura del aire y reducción en los caudales). En el caso de un incremento de la presencia de lluvias torrenciales, los efectos en calidad del agua son, por un lado, mayor capacidad de dilución de contaminantes, aunado a un incremento en el arrastre de partículas suspendidas y por ende un aumento de la turbiedad. Pero al mismo tiempo, se produce un incremento en la erosión que conlleva a un aumento en el arrastre de nutrientes y agroquímicos de zonas agrícolas. Se prevé un incremento en la temperatura del agua, como efecto del calentamiento global *per se*, el cual está relacionado con un aumento en la toxicidad de metales y compuestos orgánicos hacia la biota. Se propone que como indicadores del impacto en la calidad del agua, se de seguimiento al oxígeno disuelto, DBO₅, nitratos, metales, pH y bicarbonatos en cuerpos de agua.

En el presente estudio, se realizó un análisis a partir de un índice de vulnerabilidad actual y futura de los cuerpos de agua de México ante el cambio climático, específico del agua para abastecimiento y considerando un desarrollo socioeconómico sin cambios. Se evaluaron cinco factores confluentes: el uso, la disponibilidad, la presión y la contaminación del recurso hídrico, así como el impacto del cambio climático en la reducción de precipitación e incremento de temperatura, para los escenarios A2 (autosuficiencia y la conservación de las identidades locales) y A1B (utilización equilibrada de todo tipo de fuentes). Por orden de importancia, podría establecerse que las regiones hidrológicas Noroeste y Río Bravo, seguido de Cuencas Centrales del Norte, Baja California y Valle de México son las que muestran más susceptibilidad ante el cambio climático y sus consecuencias. Le siguen las regiones Balsas y Lerma-Santiago-Pacífico.

Los principales impactos relacionados con la calidad del agua y cambio climático, identificados a partir de la revisión bibliográfica, en sectores de interés para México son:

El **sector turismo** podrá verse afectado por la pérdida de calidad del agua en las regiones coralinas, el incremento en la presión sobre los

recursos hídricos para fuentes de abastecimiento, incremento en la contaminación bacteriológica en la zona costera, así como el desfase que hay en iniciar planes de adaptación e incrementar la resiliencia del sector. El **sector salud** podrá verse afectado por los impactos que se relacionan a la presencia de eventos extremos, donde la salud de la población se ve comprometida por irrupción de agua residual a los sistemas de agua potable, contaminación de suelos, acuíferos y sedimentos, debido a que se hacen presentes enfermedades como giardiasis, criptosporidiasis, hepatitis, entre otras. Otros efectos relacionados al incremento de temperatura (y de nutrientes), serían los florecimientos algales nocivos en embalses (principalmente) que generan toxinas que no son removidas por la potabilización tradicional del agua.

En la **agricultura**, el incremento en la temperatura aumentará la evaporación del agua superficial, lo que puede llevar al aumento de la concentración de contaminantes ya presentes en embalses, como metales y compuestos orgánicos persistentes. Las consecuencias de una mayor concentración de estos contaminantes en el agua, hacia las zonas de cultivo son relativas pues domina la adsorción en suelo y no la transferencia hacia los cultivos. Otro contaminante que incrementará su presencia es el nitrato, esto debido al mayor arrastre de las zonas de cultivo y al incremento de la concentración en suelos con el aumento de la temperatura. La agricultura que hace uso de agua subterránea en zona costera, deberá adaptarse a un incremento en la penetración de la cuña salina y la salinización. El **sector forestal** puede contribuir en mucho a la mejora de la calidad del agua. Los bosques juegan un papel importante en el ciclo hídrico al mantener la calidad y cantidad de agua, disponibilidad de agua durante el estiaje, protección de suelos que incide en una mayor infiltración y calidad del agua. Las cuencas hidrográficas cubiertas de bosques son sistemas hidrológicos excepcionalmente estables. La **biodiversidad** en nuestro país puede verse mayormente afectada, como consecuencia de cambios en calidad del agua, que serían potenciadas por el cambio climático. Los ecosistemas más vulnerables pueden ser los de lagunas costeras, manglares, arrecifes de coral y de montaña. Por otro lado, se esperaría una dominancia de comunidades fitoplanctónicas en cuerpos de agua, lo que beneficiaría a las especies invasivas.

En el estudio se desarrolla una aproximación para calcular a *grosso modo* posibles impactos económicos en México, bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico (A2 y B2) considerados por el IPCC, comparados con un escenario ideal de desarrollo para el país. Los resultados para el **sector turístico** se traducen en pérdida de beneficios por un menor dinamismo del sector, cercanas a 5.8 billones de pesos en el escenario A2 y de 1.8 billones de pesos para el escenario B2, en el período de 2008-2050, expresados en moneda constante a 2008, esto es, sin considerar la inflación. Para el **sector salud**, se calculó que podría presentarse un desembolso adicional de 45 billones de pesos para el escenario A2 para el periodo analizado. La inacción plantea que para 2050 se requeriría utilizar el equivalente hasta del 20% del

PIB para gastos en salud. La falta de información sistematizada de calidad de agua impide separar la magnitud de los problemas atribuibles a la calidad del agua, de otros efectos, donde éstos se suman para aumentar el riesgo para un determinado sector.

Se presentan medidas generales de adaptación y la manera en como éstas deberían ser desarrolladas y adoptadas. Para el abasto público de agua, si la fuente de abastecimiento es de agua superficial, la vigilancia deberá detectar y resolver problemas por mayor eutrofización, mayor arrastre de contaminantes químicos y biológicos, entre los que se encuentran los Compuestos Orgánicos Persistentes (COP's), metales, cianotoxinas y nitratos. Es posible que estos impactos generen mayores costos de potabilización. Si la fuente de abastecimiento es agua subterránea, las medidas de adaptación propuestas incluyen un mayor seguimiento a la concentración en agua de nitratos, arsénico, flúor, fenoles, benceno y otros compuestos aromáticos, tricloroetileno y otros compuestos clorados, así como aquellos COP's que son moderadamente móviles, persistentes y solubles en agua. Se vislumbra que las regiones del norte de México tendrían que iniciar su adaptación a una mayor vulnerabilidad de los recursos hídricos, particularmente la región Noroeste, Río Bravo, Valle de México, Baja California y Cuencas Centrales del Norte, seguidas por Lerma-Chapala-Pacífico y Balsas. Desde ahora podrían tomarse medidas de rehabilitación en embalses contaminados con metales en sedimentos, especialmente si son cuerpos de agua con hipoxia por temporadas prolongadas, fenómeno que incide en mayor disolución de los metales. La principal medida de reducción de impactos sobre el medio ambiente y con ello incrementar la resiliencia de los sistemas, será mediante el saneamiento en las ciudades y reúso de agua, que permitiría que en regiones donde se vea reducida la disponibilidad se cuente con volúmenes adicionales para enfrentar la escasez y reducir la presión sobre los recursos hídricos, esto incluye al sector turístico.

Los principios fundamentales para la adaptación al cambio climático son reducir los impactos directos, indirectos y los compuestos en el agua, mismos que se analizan a lo largo del estudio.

ÍNDICE

1	Introducción	4
1.1	Objetivos	5
2	Cambio climático y sus posibles afectaciones en la calidad del agua	7
2.1	Definición de impactos	7
2.2	Impacto potencial por cambios en la precipitación	10
2.3	Impacto potencial por incremento en la temperatura del agua	11
2.3.1	Modificación en la dinámica de la química ambiental	13
	<i>Por disminución de la concentración de oxígeno</i>	13
	<i>Incremento de la disponibilidad de nutrientes, iones y tóxicos</i>	14
2.4	Cambios que impactan a los ecosistemas	15
2.4.1	Eutrofización	15
2.4.2	Cambio en la relación contaminación puntual/contaminación difusa	16
2.5	Cambios que pueden impactar el abastecimiento de agua a la población	18
2.6	Otros impactos	20
2.7	Indicadores de impacto en calidad del agua por cambio climático	22
	<i>Estudios necesarios</i>	23
3	Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento en México	29
3.1	Disponibilidad del agua en México	29
3.2	Principales Usos del Agua en México	31
3.2.1	Tipo de agua usado en México	32
3.3	Presión sobre los recursos hídricos	33
3.4	Contaminación del Agua	36
3.4.1	Calidad del agua	36
3.4.2	Calidad del agua subterránea	38
3.4.3	Fenómenos meteorológicos	39
3.5	Evaluación de la vulnerabilidad del abastecimiento de agua en México ante el cambio climático	40
4	Sector turismo	48
4.1	Clima y turismo	48
4.2	Turismo y calidad del agua	50
4.3	Problemática en México	50
5	Sector Salud	54
5.1	Eventos extremos	54
5.2	Efectos relacionados con la calidad del agua	55
5.2.1	Eventos de precipitación severa	55
5.2.2	Efectos de temperatura	55
6	Otros sectores	60
6.1	Agricultura	60
6.2	Sector forestal	64
6.3	Biodiversidad	66
7	Evaluación de impactos económicos en México ante escenarios de desarrollo socioeconómicos A2 y B2	73
7.1	Descripción de la técnica prospectiva utilizada para cuantificar los impactos	73
7.1.1	Desarrollo del modelo de análisis	74
7.1.2	Recopilación de la información	76
7.1.3	Construcción de los elementos	76
7.1.4	Integración sistemática de los eventos y tendencias	77
7.2	Definición del modelo	77
7.2.1	Escenario de tendencia	78
7.2.2	Escenarios del IPCC	78
7.3	Análisis de los costos económicos en la industria turística, bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico	79

7.3.1	Construcción del escenario de tendencia para el caso de la industria turística	80
7.3.2	Construcción del escenario A2, para el caso de la industria turística.....	80
7.3.3	Construcción del escenario B2 para el caso de la industria turística.....	80
7.3.4	Resultados en la industria turística	80
7.4	Análisis de los costos económicos en el sector salud, bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico	81
7.4.1	Construcción del escenario de tendencia para el sector salud.....	82
7.4.2	Construcción del escenario A2, para el caso del Sector Salud	82
7.4.3	Construcción del escenario B2, para el caso del Sector Salud	82
7.4.4	Resultados del Sector Salud.....	83
7.5	Discusión de los resultados	83
8	Medidas de adaptación	86
8.1	Adaptación en calidad del agua	87
8.2	Adaptación en el sector agua	89
8.3	Adaptación en el sector turismo.....	90
8.4	Adaptación en el sector salud.....	92
8.5	Adaptación para otros sectores	94
8.5.1	Agricultura	94
8.5.2	Sector forestal	94
8.5.3	Biodiversidad.....	95
Anexo 1	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2 1	Comportamiento del oxígeno disuelto con respecto a la temperatura del agua (Lewis, 2006)-----	13
Fig. 3. 1	Regiones hidrológico-administrativas, contraste regional entre el desarrollo y disponibilidad de agua en México -----	29
Fig. 3.2	Disponibilidad media anual <i>per capita</i> por región hidrológica-----	30
Fig. 3. 3	Regiones hidrológico-administrativas, donde se representa la presión sobre los recursos hídricos -----	34
Fig. 3. 4	Acuíferos sobreexplotados del país-----	35
Fig. 3. 5	Acuíferos afectados por intrusión marina-----	36
Fig. 3. 6	Estaciones de monitoreo de calidad del agua-----	37
Fig. 3. 7	Calidad del agua de los recursos hídricos superficiales de México ---	38
Fig. 3. 8	Concentración de SDT en aguas subterráneas por región hidrológica -----	39
Fig. 3.9	Índice de vulnerabilidad por cantidad y calidad de agua por región hidrológica administrativa para el escenario A2, para tres climatologías, 2020s, 2050s y 2080s-----	45
Fig. 3.10	Índice de vulnerabilidad por cantidad y calidad de agua por región hidrológica administrativa para el escenario A1B, para tres climatologías 2020s, 2050s y 2080s -----	46
Fig. 4.1	Índice de confort climático en la actividad turística de 1970, 2020, 2050 y 2080 para la temporada junio-agosto (Amelung <i>et al.</i> , 2007) -----	49
Fig. 4.2	Desarrollo turístico en Nayarit (FONATUR, 2008) -----	52
Fig. 5.2	Modelo jerárquico para la transmisión del cólera (modificado de Colwell y Hug, 1994) -----	57
Fig. 6.1	Caracterización de espacios agrícolas-----	63
Fig. 6.2	Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina-----	63

Fig. 6.3 Riqueza biológica del Estado de Oaxaca-----	67
Fig. 6.4 Diversidad biológica -----	68
Figura 7.1. Representación esquemática del modelo prospectivo -----	74
Figura 7.2. Gráficas de la construcción del escenario de tendencia 2008 a 2050. a) Proyección del crecimiento de la población de la CONAPO, b) comportamiento PIB -----	75
Figura 7.3. Gráficas de resultados -----	77
Figura 7.4. Desplazamiento de la oferta y la demanda debido al aumento de los costos de viaje y al incremento de los ingresos -----	79
Figura 7.5. Líneas de tendencia de los escenarios de la industria turística -----	81
Figura 7.6. Líneas de tendencia de los escenarios del sector salud -----	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Impactos directos del cambio climático en los sistemas (adaptado de Cromwell <i>et al.</i> , 2007) -----	8
Tabla 2.2 Indicadores posibles de afectaciones a calidad del agua -----	23
Tabla 3.1 Dotación promedio de agua potable en áreas rurales y urbanas-----	31
Tabla 3.2 Usos más relevantes del agua en algunos países -----	32
Tabla 3.3 Usos del agua en México-----	32
Tabla 3.4 Proporción de agua tratada en el país-----	33
Tabla 3. 5 Grado de presión sobre el recurso hídrico-----	33
Tabla 3.6. Grado de uso de los cuerpos de agua por regiones hidrológicas, condición actual-----	40
Tabla 3.7. Reducción de precipitación por región hidrológica, según los escenarios A2 y A1B, % anual, para tres climatologías (modificado de Magaña y Caetano, 2007)-----	42
Tabla 3.8. Incremento en la temperatura por región hidrológica, según los escenarios A2 y A1B, °C, para tres climatologías (modificado de Magaña y Caetano, 2007)-----	43
Tabla 3.9. Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2020s y escenario A1B ---	44
Tabla 5.1. Especies involucradas con la salud humana (Hunter, 2003) -----	56
Tabla 6.1 Ejemplos de los principales impactos directos del cambio climático por sector -----	60
Tabla 8.1 Medidas de adaptación posibles para reducir los riesgos de salud--	93
Tabla A.1 Modelos de circulación general considerados en la elaboración de los escenarios de cambio climático regionalizados para México (Magaña y Caetano, 2007)-----	98
Tabla A.2 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2050s y escenario A1B ---	99
Tabla A.3 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2080s y escenario A1B -	100
Tabla A.4 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2020s y escenario A2 ---	101
Tabla A.5 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2050s y escenario A2 ---	102
Tabla A.6 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2080s y escenario A2 ---	103

1 Introducción

El sector hídrico es considerado uno de los más vulnerables al cambio climático, pues será propenso a alcanzar una situación de amenaza para la provisión de agua en muchos de los países menos desarrollados del mundo, en particular para los millones de personas más pobres (IPCC, 1997).

Las temperaturas más altas, la mayor variabilidad en la precipitación y en las escorrentías pueden exacerbar muchas formas de contaminación del agua, lo que impactaría a los ecosistemas, la salud humana, la confiabilidad de los sistemas hídricos y los costos de operación de la infraestructura hidráulica. Por otro lado, en condiciones de sequía severa, las prácticas agrícolas inadecuadas (deforestación, erosión del suelo y uso excesivo de agroquímicos) incrementarían el impacto sobre el agua superficial y los mantos freáticos en cuanto a su calidad y cantidad. De esta forma, se puede decir que el cambio climático en México podría traer como consecuencia una reducción de la disponibilidad y calidad del agua, incremento de la demanda y competencia entre los usos, así como una mayor vulnerabilidad a la contaminación (Bates *et al.*, 2008).

La vulnerabilidad de la población mexicana en cuanto a los impactos en la salud ante el cambio climático se relaciona con condiciones para la aparición de brotes de enfermedades transmitidas por el agua, al incremento de la temperatura y esparcimiento de vectores a nuevas zonas de infestación; a la reducción de disponibilidad de agua en zonas ya desérticas, entre muchos otros.

En años recientes, se ha dado más importancia a las relaciones clima y salud para poder plantear estrategias que favorezcan la reducción de la vulnerabilidad de la población ante condiciones extremas en el clima. El cambio climático es una amenaza para la salud de la población por lo que es necesario trabajar en materia de adaptación. Para entender los efectos del cambio climático en la salud, se propone generar escenarios epidemiológicos considerando variables climáticas que pueden relacionarse directa o indirectamente con la salud de diversos grupos y regiones, así como variables relacionadas con la etiología de cada enfermedad y variables de la vulnerabilidad de la población ante los impactos del cambio climático.

Los eventos climáticos relacionados con afectaciones a la salud de la población mexicana están vinculados con temperaturas y condiciones de humedad extremas, que llevan a condiciones favorables para la presencia de golpes de calor, brotes de enfermedades transmitidas por vector y mayor incidencia de enfermedades infecciosas relacionadas con la calidad del agua (cólera, tifoidea, hepatitis, entre otras).

Ante los escenarios de cambio climático, se determinó a partir de una revisión bibliográfica los posibles efectos sobre la calidad del agua de los cuerpos de agua

superficial y subterránea, y sus impactos en la biodiversidad, agricultura, turismo, salud y forestal.

Por medio de este análisis bibliográfico se pretende definir los impactos y la vulnerabilidad de las cuencas hidrológicas en México. La vulnerabilidad se define como el grado en que un sistema natural o social podría resultar afectado por el cambio climático y está en función de la sensibilidad de un sistema (grado con el cual un sistema responde a un cambio definido del clima, e incluye tanto efectos benéficos como perjudiciales), así como de su capacidad para adaptarse a dichos cambios. En este contexto, un sistema muy vulnerable sería aquel que fuera altamente sensible a pequeños cambios del clima, incluyendo, en el concepto de sensibilidad, la posibilidad de sufrir efectos muy perjudiciales o aquel cuya capacidad de adaptación se halle seriamente limitada. La vulnerabilidad de los sistemas ecológicos, de los sectores socioeconómicos (entre ellos la agricultura, las pesquerías y los asentamientos humanos) y de la salud humana a escala regional, crece frente a posibles cambios en el clima. Dado que los estudios disponibles no están basados en un conjunto común de escenarios del clima ni de métodos, y dadas las incertidumbres existentes respecto de la sensibilidad y adaptabilidad de los sistemas naturales y sociales, una evaluación de las vulnerabilidades regionales es necesariamente cualitativa (IPCC; 1997).

Este tipo de estudio contribuye a generar insumos para apoyar la generación de políticas de adaptación al cambio climático, con el objetivo de reducir la vulnerabilidad del sector hídrico y de los sectores relacionados con él, como son el de salud, turismo, agrícola, forestal y otros.

1.1 Objetivos

Determinar, a partir de una revisión bibliográfica exhaustiva, los impactos, la vulnerabilidad y las potenciales medidas de adaptación en el sector hídrico, así como de algunos sistemas naturales y humanos, relacionadas con las afectaciones en la disponibilidad y calidad del agua ante la variabilidad y el cambio climático.

Generar un índice de vulnerabilidad por calidad y disponibilidad de agua, considerando variables socioeconómicas y los escenarios de cambio climático regionalizados para México (a 50 km²), a partir de los resultados de los modelos de circulación general, que participaron en el análisis del Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, a escala regional y de cuencas. Los costos económicos de la inacción ante los impactos potenciales que la variabilidad climática y el cambio climático traerían, fueron evaluados en dos sectores; salud y turismo. .

Referencias bibliográficas:

- Bates B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds. 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 1997. "Resumen para Responsables de

Políticas, Impactos Regionales de Cambio Climático, Evaluación de la Vulnerabilidad". Eds. Watson, R, Zinyowera, M. C., Moss R.H., y Dokken D.J. OMM, WMO, PNUMA y UNEP. 27pp.

2 Cambio climático y sus posibles afectaciones en la calidad del agua

El agua en los ríos, acuíferos y lagos contiene en forma natural materiales suspendidos y disueltos, dependiendo de los elementos que la atmósfera contiene, condiciones geológicas y clima. Estos materiales definen las características químicas del agua. La calidad del agua es resultado directo de la entrada de los compuestos químicos, iones y gases recibidos del aire y el suelo, de los procesos biológicos, socioeconómicos, geoquímicos y físicos que transforman estas entradas, (Murdoch *et al.*, 2000; Manahan, 2004). Las contribuciones químicas directas provienen de las deposiciones atmosféricas y descargas puntuales. Las entradas indirectas de contaminantes provienen de los arrastres y disolución que hace el agua a través de la vegetación, suelo y mantos acuíferos, cada uno de los cuales contribuye en diversa medida a la composición química, física y biológica del agua. Los cambios climáticos influenciarán la calidad del agua alterando estas contribuciones, tanto a través de los cambios en la temperatura como de la humedad del aire y del suelo (Mortsch *et al.*, 2003).

Las características biológicas de un agua se definen por la biota que habita en ella, la cual abarca gran diversidad de especies adaptadas a las condiciones propias de cada cuerpo. La temperatura, sólidos disueltos y en suspensión, la velocidad de las corrientes y ciclos de mareas, entre otros, son características físicas importantes. Las características físicas y químicas de los ecosistemas acuáticos influyen sobre los componentes bióticos del ecosistema y controlan su diversidad y distribución en el tiempo y el espacio. Las características físicas y químicas ejercen su influencia tanto individual como colectivamente, sus interacciones traen consigo un ambiente que conduce al ecosistema y condiciona el origen, desarrollo y la sucesión de comunidades bióticas del mismo. La comunidad biótica dinámica interactúa continuamente y altera al ambiente abiótico, particularmente en ecosistemas acuáticos, llevando a una interacción constante entre los componentes bióticos y abióticos, los cuales son característicos para cada ecosistema (Reddy y Vijaykumar, 2005).

2.1 Definición de impactos

El fenómeno del cambio climático global es aceptado por la comunidad científica como lo presenta el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) mismo que recibió el Premio Nobel en 2008 por sus esfuerzos. No es necesario repetir la evidencia evaluada por este Panel en el presente documento, ya que es fácilmente accesible. Una manera simple de concebir los efectos del cambio climático sobre los recursos de agua es siguiendo el proceso natural que resulta cuando el agua en el ambiente se calienta y con ello: básicamente se acelera el ciclo hidrológico. Una temperatura mayor causa una evaporación más rápida, con lo que se incrementa la humedad en la atmósfera y la intensidad de precipitación a nivel global. El incremento de la intensidad de las tormentas ya ha sido documentado, lo que es consistente con las

proyecciones de los modelos climáticos globales. En contraste, las predicciones sobre la cantidad de precipitación varían considerablemente de región a región. En algunas regiones en latitudes altas y en el trópico se espera mayor precipitación, mientras que otras regiones se espera una reducción en la precipitación total. De hecho, los modelos climáticos globales muestran una amplia dispersión entre ellos, en lo que a precipitación se refiere, especialmente en las latitudes medias (IPCC, 2007).

El cambio climático ha introducido modificaciones al planeta, con consecuencias hasta cierto punto inimaginables. En un principio la comunidad científica centró su atención en predecir la tendencia del cambio en la temperatura ambiente y la precipitación. Con el tiempo, se ha extendido a predecir los cambios en otras variables como la cobertura nubosa, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento, así como las consecuencias de estos cambios (Hammond y Pryce, 2007). De hecho, es importante distinguir entre los procesos directamente originados por el cambio climático y los impactos resultantes de dichos cambios. Si bien el calentamiento global se encuentra en continuo incremento, los impactos derivados pueden involucrar muchas relaciones adicionales de causa-efecto. Para muchos de los procesos del cambio climático existe evidencia documentada de que los cambios ya se iniciaron, por ejemplo, el incremento en la temperatura ambiente. Sin embargo, sobre impactos derivados la información es aún incierta y no toda ha sido documentada (Cromwell *et al.*, 2007). Los impactos directos sobre los sistemas y el agua se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Impactos directos del cambio climático en los sistemas (adaptado de Cromwell *et al.*, 2007)

- Temporadas más calientes y más secas
 - △ Cambios en la vegetación de cuencas y en las áreas de recarga de acuíferos
 - Recarga de acuíferos alterada
 - Cambios en calidad y cantidad (carbono orgánico total, alcalinidad) de agua de las escorrentías hacia las aguas superficiales
 - △ Temperatura de agua mayor
 - Incremento en la evaporación y eutrofización en fuentes superficiales
 - Pérdida de agua almacenada en embalses
 - ▶ Cuerpos de agua más someros con agua de mayor temperatura
 - ▶ Incremento de la evaporación y eutrofización
 - Retos para la potabilización de agua y su distribución (desinfección, subproductos de la cloración, recrecimiento)
 - △ Incremento en la demanda de agua
 - Mayor demanda de agua para riego
 - Mayor demanda urbana de agua con más golpes de calor y sequías
 - Incremento en la pérdida de nivel de acuíferos para satisfacer la demanda
-
- Eventos de precipitación más intensos
 - △ Turbiedad y sedimentación mayores en la potabilización de agua
 -
 - △ Retos en el tratamiento para la filtración de agua
 - △ Riesgo mayor de daño directo por inundación a las instalaciones de los sistemas
-

de distribución de agua

→ Menor precipitación

- △ Menor disponibilidad de agua superficial
 - △ Menor disponibilidad de agua para recarga de acuíferos
 - △ Mayor dificultad para cumplir con los caudales ecológicos en aguas superficiales
-

→ Incremento del nivel del mar

- △ Incremento de la intrusión salina en acuíferos costeros
 - Retos a la potabilización del agua, incremento en los bromuros, necesidad de desalinizar agua
 - △ Incremento de salinidad en los cuerpos de agua costeros salobres
 - Retos a la potabilización del agua, incremento en los bromuros, necesidad de desalinizar agua
-

Un aspecto por destacar de la tabla 2.1 es que hay impactos que se repiten a pesar de tener causales diferentes, un ejemplo de ello es la eutrofización. También es posible observar que un área puede sufrir dos efectos diferentes y al parecer opuestos al mismo tiempo, por ejemplo, menor precipitación y lluvias más intensas. En ese caso los impactos resultantes pueden acumularse o ser opuestos también. Estos enunciados simples permiten tener un espectro bastante amplio de los impactos directos potenciales, así como de la relación entre los diversos efectos directos en el ciclo hidrológico (Cromwell *et al.*, 2007).

Los impactos indirectos se definen como aquellos resultantes de los efectos directos en su interacción con el medio ambiente. Esa distinción entre los efectos enfatiza el hecho de que la línea base de funcionamiento de los sistemas ambientales es cambiante en su naturaleza. Hay tres categorías, por lo menos, en las cuales se pueden dividir los impactos indirectos. Algunos de estos impactos, si bien indirectos, no son por ello menos importantes. Los primeros serían los impactos indirectos básicos en ecosistemas terrestres y acuáticos. Los cambios en temperatura, precipitación, patrones estacionales, características de los escurrimientos y patrones de recarga, tanto de agua superficial como subterránea (descritos en la tabla 2.1) pueden producir cambios significativos en los ecosistemas. De hecho, algunos impactos indirectos podrían ser de mayor significancia que los impactos directos. En segundo lugar están los impactos en contaminación del agua. El cambio en frecuencia e intensidad de las precipitaciones es uno de los efectos más inmediatos del calentamiento global que podría estar de manifiesto en diferentes cuerpos de agua desde las últimas décadas. Ante eventos de lluvia extrema e inundaciones, la resultante es de mayor contaminación de cuerpos de agua. Finalmente el tercer grupo se constituye por los impactos socioeconómicos (Cromwell *et al.*, 2007).

Como impactos compuestos se definen aquellos efectos acumulativos que pueden ser mayores que la suma de las partes. Entre ellos se encuentran los impactos por migración de población o los efectos en los ecosistemas costeros y de montaña (*op. cit.*).

Para evaluar la magnitud de los impactos que en calidad del agua se esperan como efecto del cambio climático, se ha analizado la bibliografía publicada al respecto, especialmente aquella que evalúa la magnitud de algunos de los cambios esperados. Sin embargo, la información disponible muestra que las evaluaciones en el tema son en muchos casos enunciativas, calificando más que cuantificando los efectos. El análisis que aquí se presenta hace una evaluación de los impactos que el cambio en precipitación y temperatura, bajo cambio climático, pueden traer a México. Para ello se toman en consideración los escenarios regionalizados (50Km²) para el país, generados a partir de los resultados de los modelos de circulación general, para los escenarios socioeconómicos A2 y A1B. Se espera una reducción entre 6 y 26% en la precipitación, aunado a un incremento en la temperatura entre 0.5 y 3.2°C (Magaña, 2008). En el siguiente capítulo se muestra la metodología a detalle para la obtención de dichas magnitudes. Estas dos variables pueden alterar la calidad del agua, sin embargo, dichos cambios se sobreponen a cambios inducidos por el ser humano y por la variabilidad climática natural, de tal manera que pocas veces es posible diferenciar y discernir la proporción que cada uno de ellos tiene en el resultado (Murdoch *et al.*, 2000).

2.2 Impacto potencial por cambios en la precipitación

Los cambios en la precipitación modifican la humedad del suelo y la vegetación con lo que pueden inducir cambios en la evaporación. La comunidad científica internacional ha descrito que la consecuencia de ello, podría llevar a reducción en flujos de agua y humedad del suelo, cambio en la temporalidad de las precipitaciones, así como modificar la cantidad de material disuelto y particulado arrastrados por la lluvia, entre otros (IPCC, 2007). Por un lado, el incremento en los flujos del agua puede diluir los contaminantes, disminuyendo las reacciones químicas en lagos y canales, reduciendo el tiempo de limpieza de los contaminantes en los cuerpos de agua e incrementando la salida de dichos contaminantes a las costas y pantanos (Jacoby, 1990; Mulholland *et al.*, 1997; Schindler, 1997). Los flujos más elevados también serían capaces de incrementar la turbiedad en el agua reduciendo la penetración de luz UV-B. Sin embargo, al mismo tiempo, una lluvia torrencial tendería a incrementar la erosión de las superficies terrestres y de los canales por donde corre el agua. Esto permitiría un mayor arrastre de nutrientes y compuestos químicos en los ríos, lo que incrementa la contaminación (Cromwell, 2007; Whitehead *et al.*, 2009). Por el contrario, cuando hay flujos bajos, las corrientes pierden turbulencia, lo que reduciría la concentración de oxígeno disuelto en el agua y disminuiría la dilución de contaminantes de fuentes puntuales. Un menor caudal tendería a tener una mayor temperatura y reducir la erosión y el arrastre de material con lo que la claridad del agua aumentaría, permitiendo el paso de la luz ultravioleta (Murdoch *et al.*, 2000). El efecto neto sobre la calidad del agua de los ríos, lagos y aguas superficiales, ante cambios en la precipitación es multifactorial, también depende de características regionales y locales específicas (Gleick y Adams, 2000). No se encontró información que evaluara la resultante de la sumatoria de estos efectos,

sin embargo, los autores de este informe consideran que en México se dan las condiciones para que estos efectos mencionados se presenten en los cuerpos de agua del país. Por otro lado, en las siguientes páginas se mencionan algunos estudios que se consideran importantes para determinar la magnitud de los impactos mencionados.

2.3 Impacto potencial por incremento en la temperatura del agua

El incremento en la temperatura promedio del aire como consecuencia del calentamiento global ha sido demostrado ampliamente. Por el contrario, la evidencia de incremento en la temperatura del océano ha recibido menos atención pública, a pesar de que es la base para calcular el incremento del nivel del mar, resultado de la expansión térmica (Levitus *et al.*, 2000). La temperatura del agua está en equilibrio cercano con la temperatura del aire: el incremento de la temperatura del aire se asocia con el aumento en la temperatura del agua. Se ha demostrado un incremento de 1-3°C en los últimos 100 años en ríos europeos como el Danubio y el Rin (EEA, 2007). Hammond y Pryce (2007) demostraron una tendencia al incremento de la temperatura del agua, especialmente a partir de 1990 en los ríos de Gran Bretaña. Los investigadores calcularon el incremento actual en 1°C, con promedios por década entre 0.03 y 0.7°C en las diversas regiones de ese país. En Suiza se han demostrado incrementos importantes en temperatura para ríos en todas las altitudes (Hari *et al.*, 2006). Para México aún no se han publicado estudios en este sentido, aunque al menos Leal y colaboradores tienen investigaciones en curso (Leal *et al.*, 2009).

Un efecto del incremento en la temperatura del agua es una mayor evaporación en los cuerpos de agua superficiales. Para California este efecto ha sido calculado para dos escenarios de cambio y variabilidad climática. La evaporación podría incrementarse de 3.6 a 41.3%, con una gran sensibilidad al incremento de la temperatura lógicamente y no a la precipitación en sí misma, tanto en el escenario A2 como en el B2 (Zhu *et al.*, 2006). Como consecuencia del aumento en la evaporación, se prevé un incremento en la concentración de contaminantes en presas y lagos, en aquellos casos donde la reducción del volumen total de agua sea de consideración. Por otro lado, es posible que se de un aumento en la productividad, ya que el incremento de la temperatura eleva el ciclo de los nutrientes y acelera la eutrofización en cuerpos de agua con suficientes nutrientes y oxígeno, lo que ha sido demostrado por Mulholland *et al.* (1997) y Mimikou *et al.* (2000). La nitrificación es un proceso de gran importancia para cuerpos de agua, pues permite la regeneración de nitrato, útil para el plancton, a partir de amonio. Algunos autores han concluido que el efecto del cambio climático sobre la productividad puede igualar a la producida por la actividad antropogénica (Justić *et al.*, 1997). En las aguas pobres de oxígeno el incremento en la productividad puede conllevar a la reducción significativa de oxígeno y con ello limitar la productividad de todo el ecosistema (Breuer *et al.*, 2002).

El aumento de la temperatura del agua incrementa en general la toxicidad de los metales en los ecosistemas acuáticos. Por ejemplo, el cobre incrementa su toxicidad en mejillones en 50% con un incremento de 5°C en la temperatura del agua. Pero, esta respuesta no es igual para todos los organismos ni para todos los metales (Moore *et al.*, 1997; Rao *et al.*, 2000). En peces sucede el mismo fenómeno; el incremento en la toxicidad de algunos metales se adjudica a la mayor producción de radicales libres que son mucho más tóxicos que el compuesto original (Nemcsók *et al.*, 1987). Estudios hechos con el gusano *Tubifex tubifex* confirman un efecto de aumento de toxicidad de hasta 17% de varios metales pesados incrementando sólo 3°C la temperatura, especialmente el cobre y zinc (Rathore y Khangarot, 2002). En el caso de los plaguicidas, la atrazina aumenta su solubilidad en 1.4% por cada grado de incremento en la temperatura (Ureña-Amate *et al.*, 2004). En cuanto al nitrógeno amoniacal se ha demostrado que un incremento en la temperatura de 2°C aumenta en 12% la toxicidad de esta especie sobre los estadios juveniles de peces. Adicionalmente, el nitrógeno amoniacal cambia su ionización con el pH, por lo que a pH 8.0 es 65% más tóxico que a pH neutro (EPA, 1999). Una combinación de temperatura alta, baja concentración de oxígeno disuelto y concentraciones subletales de amonio han mostrado que son causa de necrosis en branquias en carpas (Jeney y Nemcsók, 1992). Todas estas observaciones son de interés para nuestro país, ante el probable incremento de temperatura según los escenarios A2 y A1B. Esta problemática debe abordarse para tener información sobre los efectos esperados en los cuerpos de agua y diseñar políticas públicas que las atiendan y resuelvan.

Muchos compuestos orgánicos persistentes (COP's), tienen el potencial de ser persistentes, bioacumulables y transportables del sitio de liberación hasta grandes distancias en el ambiente. Una vez en el ambiente se pueden transferir a otra fase (sedimentos, aire, biota, suelos, agua), o bien, pueden ser transportados espacialmente y por advección mediante deposición atmosférica, bioacumulación, corrientes, depósito de partículas suspendidas y degradación. En todos estos fenómenos la temperatura juega un papel fundamental. Los modelos predicen que un incremento de la temperatura ambiente promoverá una mayor disolución de COP's en agua y reducirá la concentración en suelo y sedimentos (MacDonald *et al.*, 2003; MacDonald *et al.*, 2005; Dachs *et al.*, 2002). Los suelos, principales sumideros y reservorios de COP's, atrapan COP's pero por elevación de la temperatura se pueden removilizar (Meijer *et al.*, 2006). Como ejemplo, para el pentaclorofenol se calcula un incremento de 2.5% en su solubilidad por cada grado centígrado que se incremente la temperatura del agua (NRCC, 1982). Como consecuencia de ello puede haber biota expuesta a altas concentraciones de COP's y con ello desencadenar epidemias o susceptibilidad a enfermedades dentro de esas especies (MacDonald *et al.*, 2003; Heide-Jorgnesen *et al.*, 1992; Ross, 2002).

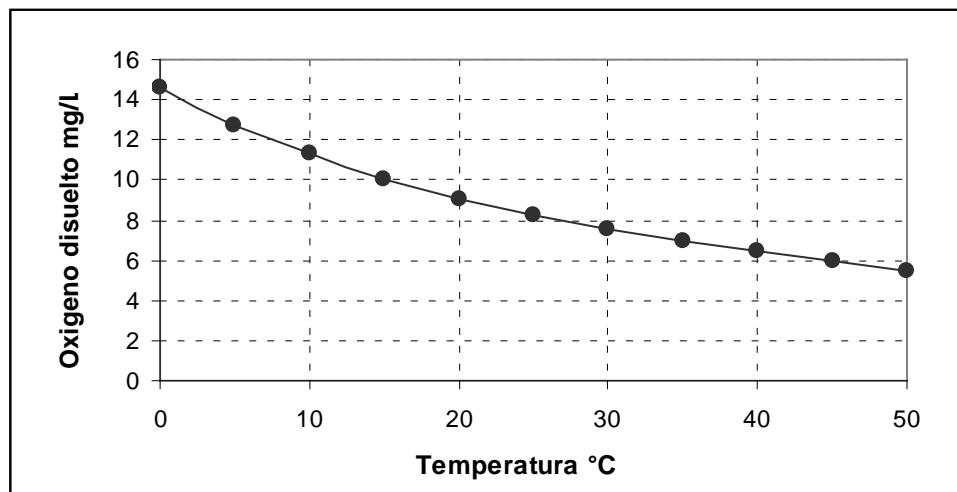
2.3.1 Modificación en la dinámica de la química ambiental

Por disminución de la concentración de oxígeno

El oxígeno disuelto en el agua es básico para el ecosistema acuático, de la misma manera que lo es en los ecosistemas terrestres. El oxígeno es parcialmente soluble en agua, fenómeno que depende de la altitud (porque esto determina la concentración de oxígeno en la atmósfera) y de la temperatura del agua. En la figura 2.1 se muestra la solubilidad del oxígeno al nivel del mar (Lewis, 2006). El incremento en la temperatura reduce la disolución de oxígeno en el agua superficial. En aguas frías, tres grados centígrados de incremento en la temperatura reducen la solubilidad del oxígeno en 1 mg/L. En cuerpos de agua cálidos, el mismo incremento de temperatura reduce en 0.6 mg/L la solubilidad del oxígeno. Debe recordarse que se considera que el límite para el correcto crecimiento y desarrollo de especies acuáticas es de 5 mg/L de oxígeno (SEDUE, 1989; Chapman, 1992). Esto significa que en cuerpos de agua fría el impacto del calentamiento de la atmósfera es menos dañino a los ecosistemas, que en cuerpos de agua cálidos, como lagunas costeras tropicales, ríos y lagunas contaminadas. Un caso crítico lo constituyen los ríos en donde el caudal ya es bajo y se tienen descargas contaminantes de consideración o donde los estándares de calidad del agua están cerca de los límites máximos (Gleick y Adams, 2000). En México muchos ríos sirven de cuerpos receptores a descargas, tal que van más allá de su capacidad de asimilación y dilución, con el consecuente incremento en la materia orgánica en ellos (CONAGUA, 2007).

Otro factor que puede disminuir la concentración de oxígeno en agua es el incremento del consumo por el metabolismo aerobio, que eleva la actividad biológica de los organismos, así como la reducción de caudal en ríos ante menores precipitaciones. Este cambio puede disminuir la productividad en cuerpos de agua, especialmente aquellos donde ya se tiene un estrés por la presencia de materia orgánica biodegradable (Jacoby, 1990).

Fig. 2 1 Comportamiento del oxígeno disuelto con respecto a la temperatura del agua (Lewis, 2006)



Existe una interacción cercana e intensa entre la temperatura del agua en la superficie y en el fondo, las entradas a un lago, su estado trófico, su geometría, la importancia relativa de los escurrimientos y las precipitaciones, la magnitud del viento y el agotamiento del oxígeno en el agua de fondo. Todo ello es susceptible de exacerbarse a raíz del cambio climático (DeStasio *et al.*, 1996). La productividad en lagos y lagunas que tienen poco oxígeno no podrá crecer, a pesar de presenciar un incremento en nutrientes. Por el contrario, los modelos muestran que esos cuerpos de agua pueden presentar anoxia por tiempos más largos (Mulholland *et al.*, 1997). Otras consecuencias en relación con las variaciones del nivel de oxígeno disuelto pueden darse por producción de nitrógeno amoniacal y sulfuros en aguas que permanecen en largos periodos de anoxia, que ya ha sido observado en lagunas someras muy contaminadas en el sur de nuestro país (Leal y Miranda, 2006). Esto ocurre cuando en un cuerpo de agua se agota el oxígeno, la población bacteriana utiliza a los nitratos y posteriormente a los sulfatos como fuente de oxígeno, con una consecuente producción de amonio y sulfuro, mismos que aumentan la toxicidad en la columna del agua o sedimentos (Lovley y Philips, 1987; Leal y Miranda, *op cit.*). La anoxia también incrementa los ciclos químicos entre el agua y los sedimentos, que dan como resultado una mayor disolución de fosfatos metálicos y al mismo tiempo una mayor transferencia de compuestos químicos del agua hacia los sedimentos dada una mayor actividad biológica (Murdoch *et al.*, 2000).

Otro factor de preocupación es la anoxia en cuerpos de agua, debida a la descarga de agua residual cruda directa o parcialmente tratada, practicada en México (Jiménez, 2001). Las descargas generan una disminución de la concentración de oxígeno en los cuerpos receptores, si la materia orgánica que vierten excede la capacidad del mismo. Esta condición se vería agravada en situaciones de incremento de la temperatura o de reducción del caudal, esperados bajo cambio climático, con consecuencias graves para el ecosistema

Incremento de la disponibilidad de nutrientes, iones y tóxicos

La erosión y la lixiviación de suelos pueden mover grandes cantidades de nutrientes, iones y compuestos químicos a cuerpos de aguas subterráneas, superficiales y zonas costeras (Dojlido y Best, 1993). Los nutrientes, especialmente el nitrógeno y el fósforo pueden crear condiciones locales de eutrofización y como resultado, generar eventos de anoxia, contaminación y mortandad masiva de peces. Esto ya ha sido observado como una condición desarrollada a través de las prácticas agrícolas y de generación de aguas residuales en las zonas urbanas, como los principales factores. Se espera que el cambio climático incremente la productividad en sistemas terrestres ya que el reciclado de nutrientes será más rápido y habrá una mayor concentración de dióxido de carbono en el aire. Estos cambios inducirán otros tantos en el agua a través del cambio en el reciclado de nutrientes a nivel de cuenca, con una mayor exportación de los mismos (Band *et al.*, 1996). Muchos suelos contienen calcio que junto con el dióxido de carbono genera carbonatos en los suelos. De éstos, los carbonatos son lixiviados a cuerpos de agua y transportados a los océanos, creándose un sumidero neto de dióxido de carbono en los océanos. El riesgo de

mayor lixiviación viene no tanto del cambio climático *per se*, como de otros eventos asociados como puede ser una mayor erosión eólica e hídrica de suelos, al disminuir la humedad de los mismos, pero también al presentarse más y mayores eventos de lluvias y escorrentías que laven los suelos, con los efectos ya mencionados en un inicio.

Se esperaría un incremento en las velocidades de transformación química en agua superficial, así como el que periodos mayores de actividad biológica resulten en un incremento en la bioacumulación de toxinas en los organismos acuáticos, con una consecuente reducción de la concentración de estas toxinas en la columna de agua. Ya se ha demostrado que en las regiones áridas de México y el sureste de Estados Unidos, las condiciones de clima cálido y seco incrementan la salinidad y el contenido de metales en el agua y como consecuencia en los suelos agrícolas de la cuenca que son irrigados con éstas (Evans y Prepas, 1996).

Los cambios provocados por el cambio climático podrían ser equilibrados a través de la regulación de las actividades humanas. Se conoce limitadamente los efectos sinérgicos entre disponibilidad elevada de nutrientes y exposición a otros contaminantes; así como entre parámetros de calidad del agua y otros factores perturbadores o aquellos que influyen en la salud y producción de las plantas marinas. Sin embargo, puede suponerse que estas sinergias son de lo más importante para predecir los cambios posibles (Schaffelke *et al.*, 2005).

2.4 Cambios que impactan a los ecosistemas

2.4.1 Eutrofización

Un medio acuático (lago, río, etc.) eutrófico, es aquel rico en nutrientes que potencia un gran desarrollo de la vegetación y la degradación progresiva del ecosistema. La eutrofización de un curso o depósito de agua puede producirse de manera natural, pero las actividades humanas pueden acelerar en gran medida este proceso. Las aguas residuales urbanas, los vertidos industriales y los escurrimientos de agua procedentes de la agricultura intensiva suministran grandes cantidades de nutrientes al agua. La eutrofización de los cuerpos de agua, en resumen, conduce a una degradación de la misma y disminuye significativamente su calidad (Pizzolon *et al.*, 1999).

En la mayor parte de los sistemas acuáticos el fósforo está considerado como el elemento limitante para que se inicie la eutrofización, de modo que se admite que a una concentración mayor de 20 µg/l, existe un riesgo potencial de que se desencadene este proceso (Sande *et al.*, 2005). En este sentido, durante el proceso de eutrofización el mejor ejemplo de los cambios que se producen lo constituye la reacción del plancton, siendo las algas uno de los mejores indicadores de contaminación por nutrientes.

Dentro de las consecuencias de la eutrofización está la mayor probabilidad de presencia de florecimientos de organismos microscópicos denominados

cianobacterias. Las cianobacterias son bacterias verdaderas, que son confundidas ocasionalmente con algas verde-azules pues se les parecen en morfología, hábitat y habilidad fotosintética. Se sabe que la probabilidad de un florecimiento de cianobacterias se incrementa si coinciden temperaturas entre 15 y 30°C, pH entre 6 y 9 o mayor, días soleados de larga duración, concentración elevada de nutrientes (especialmente amonio, nitrato y fósforo), velocidades bajas del agua y ausencia de viento. El impacto ecológico de las cianobacterias es el desarrollo de otros productores primarios. Por otro lado, ejercen una selección sobre el zooplancton que no puede alimentarse de ellas. Los peces se ven afectados tanto en su alimentación, como en la deficiencia de oxígeno que se genera al biodegradarse la biomasa de las cianobacterias, pero también por la presencia de toxinas que llegan a ser bioacumuladas en peces, zooplancton y mejillones. Estas sustancias pueden ser arrastradas a través de la cadena trófica (Dokulil y Teubner, 2000; Mitchell *et al.*, 2007).

En términos de eutrofización, diversos autores reportados por Bates *et al* (2008) mencionan que se espera un incremento de este fenómeno producido por el aumento de la temperatura. En menor medida también es considerado que los eventos de tormenta que arrastran material particulado generarán afectaciones de importancia. El incremento de la temperatura producto del cambio climático y otras condiciones favorecedoras como las descargas difusas agrícolas y las puntuales, han generado que las cianobacterias sean detectadas fuera del periodo natural, entrado ya el invierno (Brient *et al.*, 2001; ADWG, 2004). Se prevé que la eutrofización se incremente como consecuencia del cambio climático, especialmente por modificación en los factores que a continuación se exponen.

2.4.2 Cambio en la relación contaminación puntual/contaminación difusa

La contaminación difusa es aquella que proviene de actividades relacionadas con el uso de suelo (rural y urbano) y proviene de fuentes no puntuales, conocidas también como dispersas o difusas ya que no se identifica un sitio específico de vertido. Generalmente éstas son de difícil control y provienen de retornos agrícolas, silvicultura, lixiviados de residuos y desechos sólidos, erosión, drenados de minas, lavado de contaminación atmosférica, falta de drenaje, fugas y fosas sépticas. En contraste, las fuentes puntuales son identificables en un sitio, provienen de industrias o municipios y se consideran más fáciles de controlar debido a que se conoce su localización y se facilita por tanto, su cuantificación (Jiménez, 2001). La contaminación difusa del agua puede presentarse por muchas fuentes. Individualmente la fuente puede ser pequeña, pero su impacto colectivo puede estar dañando el medio ambiente (Chapman, 1992). El análisis de los flujos de los contaminantes difusos de la superficie de la tierra al agua superficial requiere un análisis de los flujos del agua (De Wit *et al.*, 2000).

Los bosques y las prácticas en el manejo de éstos han sido identificados como importantes fuentes no puntuales de contaminación del agua en áreas de la altiplanicie del Reino Unido. Un incremento en la turbiedad y sedimentación por

esta actividad se relacionan con los movimientos del suelo que se llevan a cabo al cultivarlos, al drenaje, la construcción de caminos y operaciones de cosecha, incremento de concentraciones de fosfato después de las aplicaciones aéreas de fertilizantes, los cuales conducen a la eutrofización de aguas estancadas (Nisbet, 2001).

Un estudio realizado en la bahía de Chesapeake, en Estados Unidos de América, ha sido tomado como ejemplo para un análisis profundo de las implicaciones del cambio climático a nivel cuenca, ya que presenta un intenso uso y alberga más de 15 millones de personas. En esta cuenca las actividades agrícolas tienen un impacto importante y son las responsables del 39% de las descargas de nitrógeno y 49% del fósforo que fluye a la bahía - toda vez que las descargas municipales e industriales son controladas y hay un amplio empleo de fertilizantes-, con lo que es el contribuyente más importante, antes que los aportes por agua residual, bosques, áreas urbanas y deposición atmosférica. La bahía ha sido estudiada intensamente por más de 40 años y se conoce a detalle su dinámica hídrica, química, biológica y geoquímica. Con un modelo de cuenca se simuló las condiciones de cambio climático a dos escenarios posibles, propuestos para la bahía: mayor precipitación y temperatura, mayor temperatura y menor precipitación. Los resultados muestran un 30% mayor descarga de nitrógeno y fósforo en la bahía para el primer caso, en virtud de que una mayor temperatura llevará a incrementar el área de producción de maíz, lo que combinado con una lixiviación mayor de nutrientes y una mayor precipitación en el inicio del año agrícola, arrastrarán nutrientes a ríos y aguas subterráneas. Para el segundo escenario de menor lluvia y aumento en temperatura, las cargas de nitrógeno y fósforo se incrementan un 8%, pero se percibe una gran descarga que proviene de la mayor área sembrada con maíz. El mayor uso de fertilizantes impacta tanto a la bahía como al agua subterránea, por ende a las fuentes de abastecimiento (Abler *et al.*, 2000). En la cuenca del Mississippi se ha visto que de continuar la tendencia de incremento de los precios de los fertilizantes, se reducirá su uso lo que lleva a una menor lixiviación. Lo anterior demuestra que el problema más que nada es la aplicación excesiva de fertilizantes y no el cambio climático en sí. El control de las fuentes puntuales de nitrógeno puede mitigar los impactos negativos relacionados con los efectos del clima y los cambios del uso de suelo, reduciendo la carga anual media de nitrógeno (Chang, 2004). El problema de México recae precisamente en la falta de este tipo de estudios, que permitan identificar el porcentaje de contribución al problema y su relación con las prácticas-manejos agrícolas y descargas residuales con los que se presentan bajo la variabilidad actual de clima y en condiciones de cambio climático.

La contaminación puntual en México no ha sido controlada, esto es básico para cuantificar la contaminación difusa en México y generar un diagnóstico que muestre la magnitud del aporte de escurrimientos pluviales contaminados hacia los cuerpos receptores.

2.5 Cambios que pueden impactar el abastecimiento de agua a la población

El abastecimiento de agua en México se realiza a partir de cuerpos de agua superficiales y subterráneos. En general puede decirse que los acuíferos tienen una mejor calidad del agua que los escurrimientos superficiales (Dojlido y Best, 1993). Sin embargo, esto no es siempre así. En el caso del agua subterránea, los recorridos del agua en la zona no saturada pueden ser de 1 a 10 años en una zona húmeda tropical y de 10 a 100 años o más en una zona árida. La variación climática es lo más importante para determinar los tiempos de recorrido del agua en un acuífero y no tanto las diferentes formas geológicas. Una menor infiltración natural de agua reduce el riesgo de lixiviación de contaminantes en climas áridos pero ocasiona también una menor dilución de la contaminación (Foster y Hirata, 1991). Esto significa que muy probablemente las modificaciones de la calidad del agua subterránea en zonas áridas serán observadas en plazos muy largos, a diferencia de los cambios en cuerpos superficiales que serán más inmediatos.

En agua subterránea la problemática de calidad del agua se relaciona a la presencia de elementos inorgánicos como nitratos, arsénico, flúor y otros. Para compuestos orgánicos se han señalado a nivel internacional los fenoles, benceno, tolueno, compuestos poliaromáticos, tricloroetileno, tetracloroetileno, clorobenceno, clorofenoles, cloroformo y 1,1,1 tricloroetano que son moderadamente móviles, persistentes y solubles (Howard, 2002). En el país existen pocos estudios que definan cuáles son los de mayor interés.

La concentración de nitrato en suelo se incrementa ante temperaturas más altas, por una mayor velocidad de nitrificación. Al mismo tiempo, las menores precipitaciones elevan la concentración en agua, ya sea superficial o subterránea, especialmente después de sequías severas donde la mineralización del nitrógeno es más alta (Whitehead *et al.*, 2006). Murdoch *et al.* (2000) demostraron que existe una correlación positiva entre la lixiviación de los nitratos y la temperatura ambiente. Esto debido a que una mayor temperatura incrementa la mineralización y nitrificación bacteriana en el suelo generando una mayor disponibilidad de nitratos en el suelo. Éstos al ser lixiviados pueden incrementar la concentración de nitratos en agua subterránea y superficial, generando problemas como eutrofización y presencia de nitratos en agua para consumo humano. Algunos autores han concluido que el efecto del cambio climático sobre la productividad puede igualar a la producida por la actividad antropogénica (Justić *et al.*, 1997). En los escenarios modelados para México y mostrados en el capítulo 3, se prevé un incremento en la temperatura ambiente entre 2 y 3°C para finales del siglo. Acorde a ello, esto presupondría un incremento en la generación y lixiviación de nitratos que pudiera ser entre 20 a 30% para las regiones templadas. Para temperaturas ambientales mayores a 25°C, el incremento es menor, cercano a 8% por grado centígrado de aumento (Breuer *et al.*, 2002). Esto significa que las zonas calurosas del sur del país, sufrirán menos por este efecto que las zonas de clima frío.

En condiciones de menor precipitación, es posible que se presente una reducción en el arrastre de compuestos orgánicos de origen antropogénico hacia las fuentes de abastecimiento subterráneas, impacto que es positivo hacia la calidad del agua de las mismas. Sin embargo, también pueden incrementarse problemas por olor y sabor del agua si el efecto del cambio climático es de lluvias torrenciales y por ende de una mayor lixiviación de sustancias solubles del suelo hacia el agua subterránea (Mortsch *et al.*, 2003).

La presencia de arsénico en el agua subterránea es uno de los problemas sanitarios más importantes a nivel mundial. El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la naturaleza y es tóxico para los seres vivos (Pérez y Fernández, 2002). El arsénico es un elemento tóxico que puede ser fatal aún a dosis bajas. La exposición prolongada a niveles bajos puede producir náusea y vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal y fragilidad capilar. La ingestión o inhalación prolongada de niveles bajos de arsénico inorgánico puede producir oscurecimiento de la piel y la aparición de pequeños callos o verrugas en la palma de las manos, la planta de los pies y el torso. La exposición a niveles altos de algunos compuestos orgánicos de arsénico puede producir efectos similares a los producidos por compuestos inorgánicos de arsénico. A nivel de exposición aguda, el arsénico es un neurotóxico sobre todo para la población infantil. En eventos de exposición crónica, el arsénico es capaz de causar cáncer en diferentes órganos (Monroy *et al.*, 2002).

Existen regiones en la República Mexicana donde por las características geológicas prevalentes, los acuíferos contienen arsénico y flúor disueltos en el agua en forma natural (Vega-Gleason, 2001). La presencia de arsénico por arriba de los límites que marcan los correspondientes criterios de calidad del agua en los acuíferos de México, está registrada y documentada principalmente en cuatro estados: Coahuila, Chihuahua, Durango e Hidalgo y se cuentan con datos esporádicos de detección de arsénico en pozos de Guanajuato, Zacatecas, Oaxaca, Morelos y Puebla. En 26 municipios de los estados antes mencionados existe alguna información sobre presencia de arsénico y fluoruros, en los cuales la población probablemente expuesta corresponde a más de 2 millones de habitantes (Vega-Gleason, 2001; Martínez, 2002).

El flúor es un elemento común en la corteza terrestre. Los niveles de exposición a este elemento dependen de la zona geográfica. Algunos alimentos son especialmente ricos en flúor, como el té negro (de bajo consumo en el país) y el pescado. El uso de pasta de dientes fluorada dará lugar a una ingesta adicional. La presencia de flúor en el agua depende de circunstancias naturales. El agua subterránea puede contener elevadas concentraciones, que sobrepasan el límite máximo establecido por la norma de agua potable. Los estudios epidemiológicos realizados a la fecha no han encontrado evidencia de carcinogenicidad por parte de este elemento. A concentraciones mayores a 1.5 mg/L de fluoruros en agua, el esmalte dental se tiñe, condición que es conocida como fluorosis dental. En caso de ingestión de agua con concentraciones de fluoruros mayores a 4 mg/L se ha detectado una prevalencia de fluorosis esquelética, fracturas óseas, daños

renales, trastornos gastrointestinales y cáncer (OMS, 2008; Hurtado-Jiménez y Gardea-Torresdey, 2005). La problemática de la presencia de flúor en exceso en el agua para consumo humano en el país, se ve incrementada debido a la falta de control sobre la ingestión de flúor por otras vías como son la sal (adicionada) y las pastas de dientes, principalmente.

Es posible que se incremente la concentración de flúor y arsénico en aguas subterráneas, dado que habrá menor infiltración y mayor demanda de agua con el aumento de la temperatura ambiente. Esto hará necesario un monitoreo mayor de las zonas afectadas, así como de zonas en riesgo potencial, así como la implementación de sistemas de remoción que mejoren la calidad del agua para consumo humano.

Una menor descarga en ríos y menor infiltración de agua subterránea, pero en especial la elevación del nivel del mar pueden resultar en una mayor intrusión salina en acuíferos, así como perjudicar fuentes de abastecimiento en ríos durante el estiaje, lo que ya ocurre en zonas costeras, donde la extracción de agua excede la disponibilidad.

En aquellas ciudades que se abastecen de agua superficial, la problemática que puede presentarse está muy relacionada a la que se presenta para ecosistemas. A lo anterior es importante aunar el costo que para los sistemas de abastecimiento representará la dificultad de remover sustancias o elementos en mayores concentraciones (DEH, 2005).

2.6 Otros impactos

Otros cambios severos se relacionan con la acidificación del agua de mar por una mayor disolución de dióxido de carbono en el agua de mar. La acidificación reduce la calcificación de conchas y esqueletos, irrumpe los ecosistemas irreversiblemente- especialmente en los altamente sensibles a cambios de pH como los arrecifes coralinos- y daña también moluscos y ciertos tipos de plancton (Stern, 2006). Adicionalmente, se supone que en algunos casos los efectos del cambio climático pueden ser positivos sobre los lagos con baja capacidad de amortiguamiento de la acidez, pues la elevación de temperatura y el incremento en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera promueven la generación de alcalinidad en el agua y reduce los efectos por el derretimiento de la nieve en la primavera. Se proyecta una mayor incidencia de enfermedades de los arrecifes coralinos y pastos marinos, especialmente en el mar Caribe y en océanos templados. Ésta ya ha sido reportado en relación con el incremento de temperatura del agua asociada con El Niño (Parry *et al.*, 2007).

Esto indica que los efectos de un clima más seco y cálido en sistemas estuarinos, al igual que en sistemas de agua dulce, estaría influenciado fuertemente por factores de control locales. Se espera que debido al calentamiento de la atmósfera y de la superficie del océano, se inhiba la mezcla de capas de diferente densidad,

es decir, se incremente la estratificación del agua. Esto llevaría a una reducción en la mezcla y la introducción de nutrientes provenientes de las capas oceánicas más profundas lo que disminuiría la productividad con importantes consecuencias para la pesquería (Doney, 2006).

La inundación de humedales, planicies de inundación, así como terrenos bajos se ha visto que genera una mayor movilización de metales y compuestos orgánicos a partir de los suelos, mayor movilización del mercurio y su metilación, así como mayor actividad anaeróbica en suelos saturados, lo que lleva a reducción de sulfatos y desnitrificación, como se ha observado en las lagunas tropicales anóxicas. Para el Golfo de México se ha proyectado que habría al menos una pérdida de 30% de oxígeno en el verano, si se incrementa 20% las descargas de agua dulce del río Mississippi (Jacob, 2008).

El cambio en la temperatura del agua genera cambios en la composición de especies así como en procesos de apareamiento, ovodeposición, crecimiento y formación de estadios juveniles. Estos cambios pueden generar desfase de la relación presa/predador y poner en riesgo la estructura de la red trófica marina (Hoepffner *et al.*, 2006)

El análisis de datos ambientales que provienen de ecosistemas se ve dificultado por la imposibilidad de diferenciar entre los impactos antropogénicos ya manifiestos, de aquellos generados específicamente por el cambio climático. Otros cambios, como los de uso de suelo, contaminación tóxica, deposición de contaminantes, modificaciones hidrológicas o sobrepesca hacen complicado o imposible la separación de efectos en las series de tiempo de datos, en los casos en que ellas existan (Bleckner, 2006).

Las actividades de contacto con el agua, particularmente la natación, pueden ser afectadas por los cambios de la calidad del agua. Los desbordamientos del alcantarillado y el arrastre de contaminantes pueden incrementarse con eventos de precipitación más intensos; un mayor número de playas pueden ser cerradas debido a la contaminación bacteriana, temperaturas del agua más calientes pueden también incrementar el potencial para el florecimiento de las algas durante el verano. Cambios en el hábitat y variedad de peces, aves acuáticas, otras aves y mamíferos alteran las oportunidades para pescar con caña, para la caza y la observación de pájaros (Mortsch *et al.*, 2003).

El cambio en uso de suelo en combinación con lluvias intensas genera un mayor arrastre de sedimentos. Una vez en aguas costeras los arrastres de sólidos se sedimentan, por fenómenos de mareas, vientos o dragados pueden ser resuspendidos (Bordalo, 2003). Hay una relación inversa entre coliformes fecales y temperatura del agua y salinidad, que fue detectada en estudios durante El Niño Oscilación del Sur (*El Niño-Southern Oscillation*, ENSO, por sus siglas en inglés) en el Golfo de México. Durante años más húmedos, los escurrimientos a aguas costeras se incrementan, y son acompañados por un incremento en las bacterias coliformes (Lipp *et al.*, 2001). Es conocido que en general un incremento en

precipitación y escurrimientos resulta en un incremento en la carga contaminante a las aguas superficiales. Los eventos de El Niño intensos también tienen un impacto en la frecuencia y mayor duración de la veda sobre cosecha de mariscos lo que genera impactos económicos negativos. Por el contrario, el evento La Niña incrementa los días de zona abierta a cosecha, pues se mantienen bajos los niveles de coliformes fecales en el agua. Con esto se podría evaluar los efectos potenciales del cambio climático en calidad del agua y en la clasificación de aguas para cultivo de mariscos y proteger la salud humana (Chigbu *et al.*, 2004).

Existe evidencia de que el calentamiento en los mares asociados con El Niño incrementa el riesgo de los humanos a la intoxicación por la ocurrencia de florecimientos de algas tóxicas (McMichael y Githeko, 2001). De esta forma, las biotoxinas asociadas con aguas más cálidas pudieran extender su rango a mayores latitudes (Tester, 1994).

Los cuerpos de agua que se verán más impactados en México considerando efectos sinérgicos del cambio climático con otros discutidos hasta el momento, serán aquellos con un nivel de medio a elevado de contaminación, como el Río Pánuco, Lerma, Santiago, Blanco, Coatzacoalcos, Apatlaco, entre otros (CONAGUA, 2007) ya que presentan en general bajas concentraciones de oxígeno disuelto, en el límite o debajo del límite de sobrevivencia de especies acuáticas.

2.7 Indicadores de impacto en calidad del agua por cambio climático

En cuanto a cómo debería darse seguimiento, qué indicadores usar y qué criterios deberían aplicarse para evaluar las afectaciones en la calidad del agua, numerosos estudios de los anteriormente referidos exponen los cambios que se prevén en la calidad del agua. En la mayor parte de los casos son cambios que se observan ya en los diferentes cuerpos de agua, por ejemplo la acidificación de los océanos. En el inciso 2.3 se presentó la tendencia a una mayor producción de nitrato en suelos y arrastre hacia el agua por incremento de la temperatura. Por ello se propone al nitrato como un indicador de estas afectaciones. En el capítulo 5 de impactos en salud, se expone la relación entre presencia de coliformes fecales en agua y ocurrencia de precipitaciones, lo que podría ser considerado como indicador, ver tabla 2.2.

Tabla 2.2 Indicadores posibles de afectaciones a calidad del agua

Fuente o cuerpo de agua	Indicador	Cambio esperado bajo CC
Embalse o lago no contaminado	Oxígeno disuelto	Reducción
	Demanda Bioquímica de Oxígeno	Incremento
Fuente de abastecimiento para consumo humano	Nitratos	Incremento
	Coliformes fecales	Incremento
	Metales	Incremento
	pH	Reducción
Agua de mar	Bicarbonatos/ácido carbónico	Incremento
	Metales	Incremento

En nuestro país se inicia la investigación en la materia y debido a que hay una gran escasez de series de tiempo de datos de calidad de agua que tengan la suficiente cantidad y calidad, es imposible hasta ahora definir un indicador, para cada tipo de cuerpo y uso de agua. Es posible que sean útiles mediciones de oxígeno disuelto, DBO₅, nitratos, coliformes fecales, entre otros.

Una vez que se determinen los parámetros que en cada tipo de cuerpo de agua pudieran servir de indicadores de la afectación relacionada al cambio climático, se podrá desarrollar una metodología para darle seguimiento. Por la experiencia que se tiene en calidad del agua, es posible que en cuerpos de agua contaminados deba hacerse la evaluación en manera diferente que cuando el cuerpo de agua está libre de contaminantes. El reto que ahora se tiene es cómo diferenciar los efectos antropogénicos de los efectos relacionados al cambio climático. Una manera podría ser comparando cuerpos de agua cercanos, donde uno tenga una influencia antropogénica fuerte y otro esté libre de ella. Sin embargo, los datos más antiguos que se tienen son de la década de los 70's, lo que limita las comparaciones. Es necesario fortalecer desde ahora los sistemas de monitoreo y la sistematización de la información y fomentar la toma de decisiones encaminadas a ejercer acciones para el mejoramiento del estado de los cuerpos de agua e identificar las afectaciones de éstos relacionadas al cambio climático con el objetivo de mejorar las condiciones de los mismos y a su vez de los ecosistemas que dependen de ellos.

Estudios necesarios

A lo largo de este capítulo se ha mostrado el tipo de evidencia que se requiere para determinar los impactos previsibles en calidad del agua, relacionada con la variabilidad y el cambio climático, especialmente si se desea cuantificar cada uno de los impactos esperados. Una gran variedad de estudios son necesarios en México, tales como determinar la magnitud de la contaminación difusa, estudiar el impacto de la reducción en la precipitación, determinar la magnitud del incremento de la temperatura del agua, estudiar la sinergia entre disponibilidad de nutrientes elevada y otros factores confluyentes, determinar el impacto de la reducción de la precipitación sobre la presencia de arsénico en agua, etc. Adicionalmente, hace falta información pública sobre datos de calidad del agua, de tal manera que las

universidades y otras organizaciones puedan hacer uso de esa información y generen más estudios, como aplicaciones de modelos y similares. En la medida en que se generen datos confiables y series de tiempo largas, la incertidumbre de las modelaciones y evaluaciones de impactos se reducirá.

Referencias bibliográficas:

- Abler D.G., J.S. Shortle y J. Carmichael. 2000. Agriculture and the Chesapeake Bay. En: Agriculture and the Environment: Interactions with Climate. U.S. National Climate Change Assessment. Agriculture Sector Assessment. Preparing for a Changing Climate: The Potential Consequences of Climate Variability and Change- Mid-Atlantic Foundations. Pennsylvania.
- Australian Drinking Water Guidelines 6. 2004. National Water Quality Management Strategy. Natural Resource Management Ministerial Council. NHMRC. <http://www.nhmrc.gov.au>.
- Band L. E., D. S. Mackay, I. F. Creed, R. Semkin, y D. Jeifries. 1996. Ecosystem Processes at Watershed Scale: Sensitivity to Potential Climate Change. Limnology and Oceanography 41:928-938.
- Bates B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Bleckner T. 2006. Sensitivity of freshwater ecosystems for climate change impacts. International Workshop on climate change Impacts on the Water Cycle, Resources and Quality. 25 -26 septiembre. Brussels.
- Bordalo A.A. 2003. Microbiological water quality in urban coastal beaches: the influence of water dynamics and optimization of the sampling strategy. Water Res. 37, 3233–3241.
- Breuer L., R. Kiese y K. Butterbach-Bahl. 2002. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils. J Soil Science, 66, 834-844.
- Brient L., C. Vézic y G. Bertru. 2001. Evaluation des efflorescences a cyanobactéries dans des eaux de courg d'eau Bretones. Université de Rennes I. Francia. Disponible en www.euabretagne.fr/lecture.
- Chang H. 2004. Water Quality impacts and land use changes in Southeastern Pennsylvania. The Professional Geographer 56, 2, 240-257.
- Chapman D. (ed). 1992. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring. UNESCO, WHO, UNEP, Chapman & Hall, London, 585 pp.
- Chigbu P., S. Gordon y T. Strange. 2004. Influence of inter-annual variations in climatic factors on fecal coliform levels in Mississippi Sound. Water Research Vol. 38, 4341–4352.
- CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales Eds. Rodríguez, T. J., Jaimes, M. O. México, 263 pp
- Cromwell J.E., J.B. Smith y R.S. Raucher. 2007. Implications of Climate Change for Urban Water Utilities. Association of Metropolitan Water Agencies. Washington. D.C. 20 pp.
- Dachs J., R. Lohmann, W.A. Ockenden, L. Méjanelle, S.J. Eisenreich y K.C. Jones. 2002. Oceanic biogeochemical controls on global dynamics of persistent organic pollutants. Environ. Sci. Technol. 36, 4229-4237.
- De Witt M., C Meinardi, F. Wendland y R. Kunkel. 2000. Modelling water fluxes for the analysis of diffuse pollution at the river basin scale. Hydrological processes vol. 14, no10, pp. 1707-1723.
- Department of the Environment and Heritage. 2005. Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an efficient adaptation response in Australia. Australian Greenhouse Office. 159 pp.

- DeStasio B.T., D.K. Hill, J.M. Kleinhans, N.P. Nibbelink, y J.J. Magnuson. 1996. Potential Effects of Global Climate Change on North-Temperate Lakes: Physics, Fish, and Plankton. *Limnology and Oceanography* 41:1136-1149.
- Dojlido J. y G.A. Best. 1993. *Chemistry of water and water pollution*. Ellis Horwood. 363 pp.
- Dokulil M.T. y K. Teubner. 2000. Cyanobacterial dominante in lakes. *Hydrobiologia*. 438:1-12.
- Doney S.C. 2006. Plankton in a warmer World. *Nature* 444: 695-696.
- Environment Protection Agency (EPA). 1999. 1999 Update of Ambient Water Quality Criteria for Ammonia. EPA-822-R-99-014. Washington D.C. 153 pp.
- European Environmental Agency. 2007. Reporte Técnico 2. Copenhagen. 114 pp.
- Evans J.C. y E.E. Prepas. 1996. Potential Effects of Climate Change on Ion Chemistry and Phytoplankton Communities in Prairie Saline Lakes. *Limnology and Oceanography* 41:1063-1076.
- Foster S. y R. Hirata. 1991. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. OPS/CEPIS.
- Gleick P.H. y D.B. Adams. 2000. *Water: The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the Water Resources of the United States*. The Report of the Water Sector Assessment Team of the National Assessment of the Potential Consequences of Climate Variability and Change. USCC.
- Hammond D y R. Pryce. 2007. Climate change impacts and water temperature. Science Report SC060017/SR. Environment Agency. Gran Bretaña. 111 pp.
- Hari R. E., D.M. Livingstone, R. Siber, P. Burkhardt-Holm y H. Güttinger. 2006. Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 12, 10-26.
- Heide-Jorgensen M-P., T. Härkönen, R. Dietz y P.M. Thompson. 1992. Retrospective of the 1988 European seal episodic. *Dis. Aquat. Org.* 13, 37-42.
- Hoepffner N., M.D. Dowell, M. Edwards, S. Fonda-Umani, D.R. Green, B. Greenaway, B. Hansen, C. Heinze, J.M. Leppänen, E. Lipiatou, E. Özsoy, C.J.M. Philipart, W. Salomons, A. Sanchez-Arcilla, W. Schrimpf, C. Schrum, A. Theocaris, M. Tsimplis, F. Veloso Gomes, F. Wakenhut y J. M. Zaldivar. 2006. Marine and Coastal Dimension of Climate Change in Europe. A report to the European Water Directors. Institute for Environment and Sustainability, Joint Research Centre, European Commission. EUR 22554 EN.
- Howard K.W.F. 2002. Urban Groundwater Issues-An Introduction. En: *Current problems of Hydrogeology in Urban areas, urban agglomerates and industrial centres*. En: Howard K.W.F. y R.G. Israfilov (eds). IV. Earth and Environmental Sciences. Vol 8. NATO Science Series.1-16 pp.
- Hurtado-Jiménez R. y J. Gardea-Torresdey. 2005. Estimación de la exposición a fluoruros en Los Altos de Jalisco, México. *Salud Pública Méx.* 47: 58-63.
- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jacob J. 2008. ¿El cambio climático afectará el desarrollo social y la calidad de vida en las costas? Segundo Panel internacional sobre cambio climático: La zona costera y su impacto ecológico, económico y social. INECOL, Xalapa, Ver. 16 de octubre.
- Jacoby H. D. 1990. Water Quality. In: *Climate Change and U.S. Water Resources*, P. E. Waggoner (Editor). John Wiley and Sons, New York, New York, pp. 307-328.
- Jeney G. y J. Nemcsók. 1992. Acute effect of sublethal ammonia concentrations on common carp (*Cyprinus carpio* L.). II. Effect on ammonia on blood plasma transaminases (GOT, GTP), G1DH enzyme activity, and ATP value. *Aquaculture* 104:149–156.
- Jiménez C. B. 2001. La Contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. Instituto de Ingeniería UNAM. Ed. Limusa FEMSA y Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. 154 pp.
- Justić D, N Rabalais y E. Turner. 1997. Impacts of climate change on net productivity of coastal waters: implications for carbon budgets and hypoxia. *Climate Research* 8: 225-237

- Leal M.T. y S. Miranda. 2006. Estudio de clasificación de la laguna El Limón, San Miguel, Chiapas. Anuario 2005 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. 88-91.
- Leal M.T., D.V. Millán y C. Vázquez. 2009. Impact of climate change on quality of water. FCO/IMTA. (Com. Pers.)
- Levitus S., J.I. Antonov, T.P. Boyer y C. Stephens. 2000. Warming of the World Ocean. *Science*. 287, 2225-2259.
- Lewis M.E. 2006. Dissolved oxygen. En: US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Book 9. Cap. 6. National Field Manual for the collection of water-quality data. Consultado en: <http://pubs.water.usgs.gov/twri9A6/> el 15 de junio 2009.
- Lipp E.K., R. Kurz, R. Vincent, C. Rodriguez-Palacios, S. Farrah y J.B. Rose. 2001. Seasonal variability and weather effects on microbial fecal pollution and enteric pathogens in a subtropical estuary. *Estuaries* 24, 266–276.
- Lovley D. y E. Phillips. 1987. Competitive mechanisms for inhibition of sulfate reduction and methane production in the zone of ferric iron reduction in sediments. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol 53 p 2636-2641.
- MacDonald R.W., D. Mackay, y F. Li y B. Hickie. 2003. How will global climate change affect risks from long-range transport of persistent organic pollutants? *Human and Ecological Risk Assess.* 9, 643-660.
- MacDonald R.W., T. Harner y J. Fyfe. 2005. Recent climate change in the Arctic and its impact on contaminant pathways and interpretation of temporal trend data. *Sci. Total Environ.* 342, 5-86.
- Magaña O.V. 2008. Mapas elaborados para los escenarios A2 y A1B, propuestos por el IPCC, que muestran proyecciones para las climatologías 2020s, 2050s y 2080s. Instituto de Ciencias de la Atmósfera UNAM.
- Manahan S.E. 2004. *Environmental Chemistry*. CRC Press. Edición 8. Boca Ratón, Florida. 783 pp.
- Martínez A. 2002. Calidad de agua para consumo humano en México. En: *Memorias del Encuentro sobre uso y resultados de la aplicación de tecnologías económicas para la purificación de aguas en América Latina*. Buenos Aires, 8 y 9 de noviembre.
- McMichael A. y A. Githeko. 2001. Human Health. En: JJ McCarthy, OF Canziani, NA Leary, DJ Dokken y KS White. *Climate Change 2001. Impacts, adaptation and Vulnerability*. Cambridge Press. Australia. 451-485 pp.
- Meijer S.N., J. Dachs, P. Fernandez, L. Camarero, J. Catalan, S. Del Vento, B. van Drooge, E. Jurado y J.O. Grimalt. 2006. Modelling the dynamic air–water–sediment coupled fluxes and occurrence of polychlorinated biphenyls in a high altitude lake. *Environmental Pollution*. Volume 140, Issue 3, April, 546-560.
- Mimikou M.A., E. Baltas, E. Varanou y K. Pantazis. 2000. Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *J Hydrol.* 234, 1-2, 95-109.
- Mitchell R.J., M. D. Morecroft, M. Acreman, H.Q.P. Crick, M. Frost, M. Harley, I.M.D. Maclean, O. Mountford, J. Piper, H. Pointer, M.M. Rehfisch, L.C. Ross, R. J. Smithers, A. Stott, C.A. Walmsley, O. Watts y E. Wilson. 2007. *England biodiversity strategy – towards adaptation to climate change*. Department for Environment, Food and Rural Areas. United Kingdom. Report No. CR0327. 194 pp
- Monroy M., F. Díaz-Barriga, I. Razo y L. Carrizales. 2002. Evaluación de la contaminación por arsénico y metales pesados (Pb, Cu, Zn) y análisis de riesgo en salud en Villa de la Paz-Matehuala, S.L.P. Instituto de Metalurgia, U.A.S.L.P. Nota informativa.
- Moore M.V., M.L. Pace, J.R. Mather, P.S. Murdoch, R.W. Howarth, C.L. Folt, C.Y. Chen, H.F. Hemond, P.A. Flebbe, y C.T. Driscoll. 1997. Potential effects of climate change on freshwater ecosystems of the New England/Mid-Atlantic Region. *Hydrological Processes*, Vol. 11, pp. 925-947.
- Mortsch L., M. Alden y J.D. Scheraga. 2003. *Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Region. Risks, Opportunities, and Responses*. En: *Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Basin*. International Joint Commission. <http://www.ijc.org>
- Mulholland P.J., G.R. Best, C.C. Coutant, G.M. Hornsberger, J.L. Meyer, P.J. Robinson, J.R. Stenberg, R.E. Turner, F. Vera-Herrera y R. Wetzel. 1997. *Effects of Climate Change*

on Freshwater Ecosystems of the South-Eastern United States and the Gulf Coast of Mexico. *Hydrological Processes* 11:949-970.

- Murdoch P.S., J. S. Baron y T.L. Millar. 2000. Potential Effects of climate change on surface-water quality in North America. *J. Ame. Water Resources Ass.* 36, 2, 347-366.
- National Research Council Canada. 1982. Chlorinated phenols: Criteria for environmental quality. Associate Committee on Scientific Criteria for environment quality. Environment Canada.
- Nemcsók J., L. Orbán, B. Asztalos y É. Vig. 1987. Accumulation of pesticides in the organs of carp, *Cyprinus carpio* L., at 4 and 20 C. *Bull Environ Contam Toxicol* 39:370-378.
- Nisbet T. R. 2001. The role of forest management in controlling diffuse pollution in UK forestry. *Forest Ecology and Management*. Volume 143, Números 1-3, 215-226.
- Organización Mundial de la Salud. 2008. Guidelines for Drinking-water Quality, incorporating 1st and 2nd addenda. Vol. 1. Recommendations. 3rd ed. 668 pp.
- Parry M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden y C.E. Hanson, Eds. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1000pp.
- Pérez-Carrera A. y A. Fernández-Cirelli. 2002. Niveles de arsénico y flúor en agua de bebida animal en establecimientos de producción lechera. *InVet.* 2004, 6(1) 51-59.
- Pizzolon L., B. Tracanna, C. Prosperi y J. Guerrero. 1999. Cyanobacterial blooms in argentinean inland waters. *Lakes and Reservoirs Vol. 4*: 101-105.
- Rao D., G. V. Prasada y M.A.Q. Khan. 2000. Zebra Mussels: Enhancement of copper toxicity by High Temperature and Its relationship with respiration and metabolism. *Water Environment Research*, 72, 2, 175-178.
- Rathore R. S. y Khangarot B. S. 2002. Effects of Temperature on the Sensitivity of Sludge Worm *Tubifex tubifex* Müller to Selected Heavy Metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 53 (1), 27-36 pp.
- Reddy V. y A. Vijaykumar. 2005. Seasonal Sufracesater Quality and Sediment Characteristics of the Urban Eutrophic Husainsagar Lake in Hyderabad, India. En: Reddy V. Restoration and Management of Tropical Eutrophic Lakes. Science Publishers. Plymouth, U.K. 533 pp.
- Ross P.S. 2002. The role of immunotoxic environmental contaminants in facilitating the emergence of infectious diseases in marine mammals. *Hum. Ecol. Risk. Assess.* 8, 277-292.
- Sande P., J.M. Mirás, E. Vidal y A. Paz. 2005. Formas de Fósforo y su Relación con la erosión en aguas superficiales bajo clima atlántico. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol VII*. F.J. Samper Calvete y A. Paz González.
- Schaffelke B., J. Mellors y N. Duke. 2005. Water quality in the Great Barrier Reef region: responses of mangrove, seagrass and macroalgal communities. *Marine Pollution Bulletin* 51, 279-296.
- Schindler D. W. 1997. Widespread Effects of Climatic Warming on Freshwater Ecosystems in North America. *Hydrological Processes* 11:225-251.
- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. 1989. Criterios Ecológicos de Calidad del Agua. *Diario Oficial de la Federación*. 13 de diciembre.
- Stern N. 2006. Stern review on the Economics of Climate Change. Disponible en : www.sternreview.org.uk
- Tester P.A. 1994. Harmful marine phytoplankton and shellfish toxicity: potential consequences of climate change. *Annals of New York Academy of Sciences*. 740:69-76.
- Ureña-Amate M.D., M. Socías-Viciano, E González-Pradas y M. Saifi. 2004. Effects of ionic strength and temperatura on adsorption of Atrazine by a heat treated kerolite. *Chemosphere* 59, 1, 69-74.
- Vega-Gleason S. 2001. Riesgo sanitario ambiental por la presencia de arsénico y fluoruros en los acuíferos de México. Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, México D.F.
- Whitehead P.G., D. Wilby, R.W. Battarbee, M. Kernan y A.J. Wade. 2009. A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydr. Sci.* 54, 1, 101- 123.

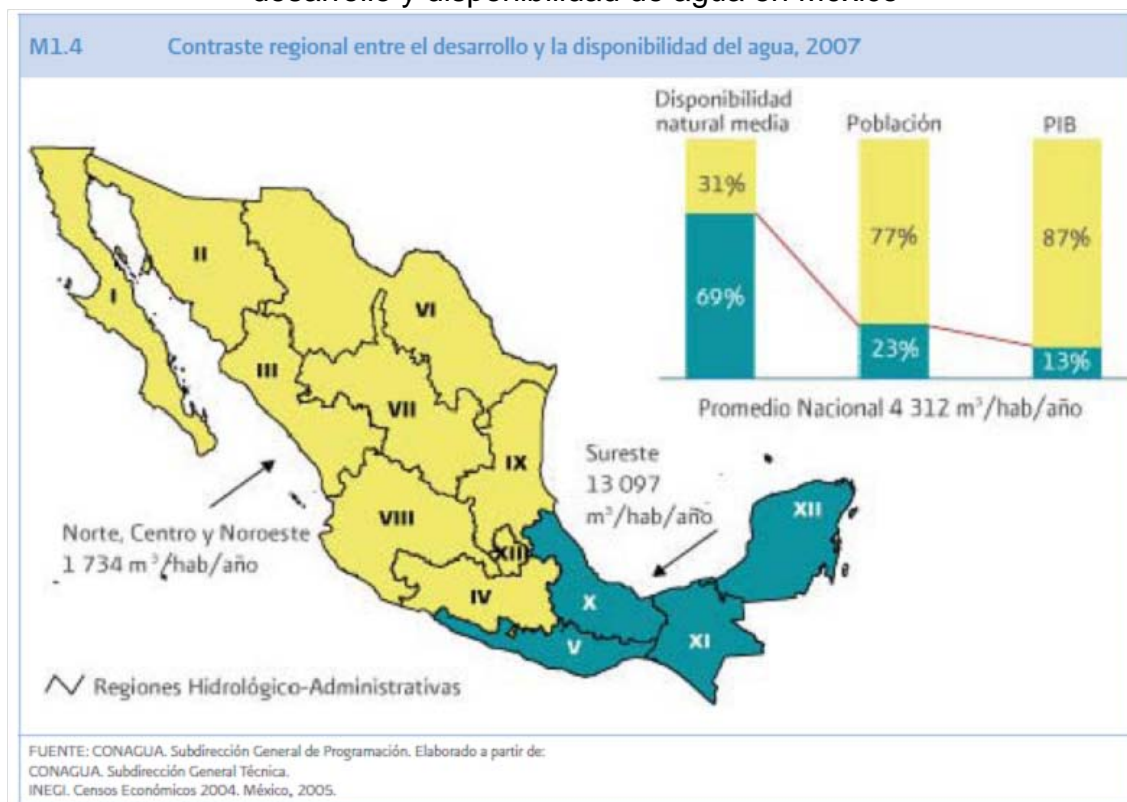
- Whitehead P.G., R.L. Wilby, D. Butterfield y A.J. Wade. 2006. Impacts of climate change on in-stream nitrogen in a lowland chalk stream: An appraisal of adaptation strategies. *Sci. Total Environ.* 365, 204-220.
- Zhu T., M.W. Jenkins y J.R. Lund. 2006. Estimated impacts of climate warming on California water availability under twelve future- climate scenarios. PIER Project Report Number 2006-003. California Energy Commission. 60 pp.

3 Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento en México

3.1 Disponibilidad del agua en México

Para la administración del recurso hídrico, el país se encuentra dividido en XIII regiones hidrológico-administrativas, éstas se pueden agrupar en dos grandes zonas con marcados contrastes: la zona norte, centro y noroeste, donde se concentra el 77% de la población, se genera el 87% del Producto Interno Bruto (PIB), pero únicamente ocurre el 31% del agua renovable; y la zona sur y sureste, donde habita el 23% de la población, se genera el 13% del PIB y ocurre el 69% del agua renovable. La figura 3.1 ilustra la disparidad entre esas dos zonas en cuanto a su disponibilidad de agua y su actividad económica (CONAGUA, 2008). Esto significa que donde hay menos agua, hay más población y se genera mayor riqueza. Donde el agua abunda, la población es menor y se genera poca riqueza (Kauffer, 2006).

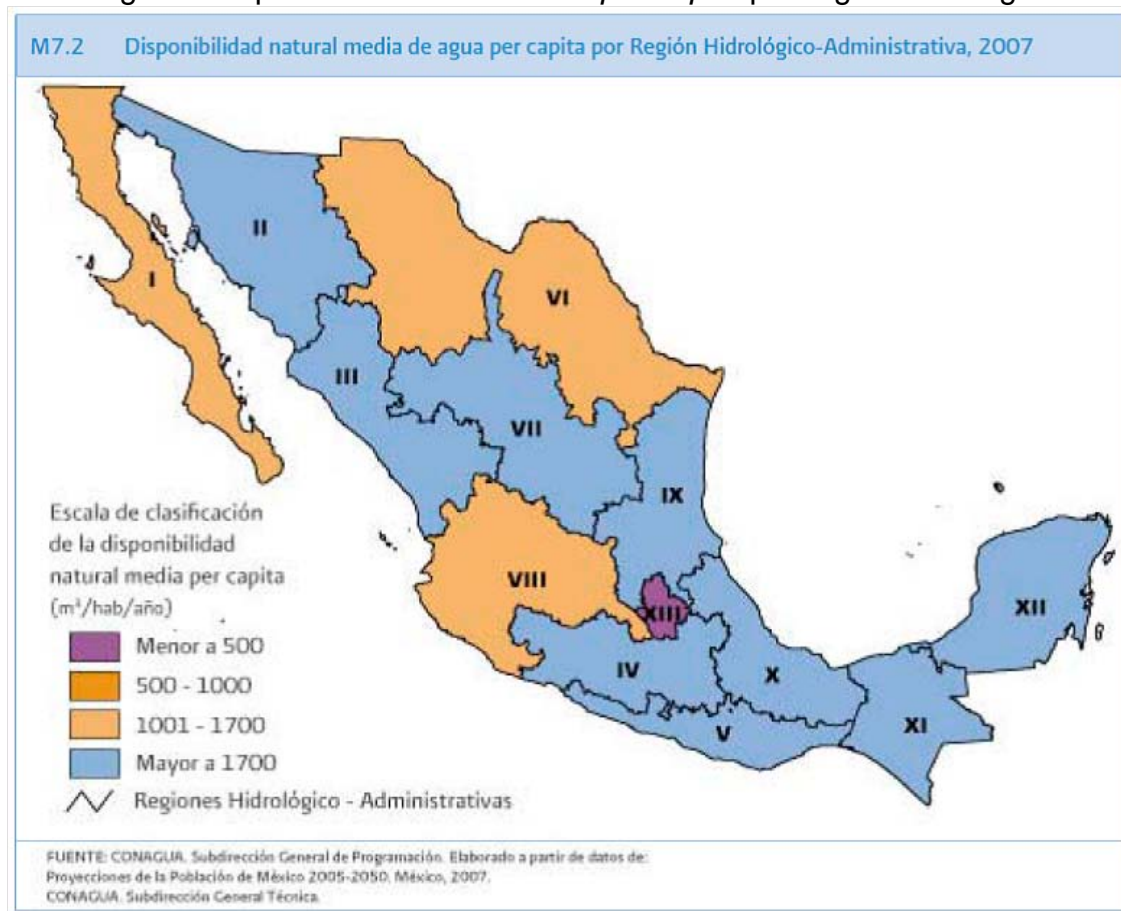
Fig. 3. 1 Regiones hidrológico-administrativas, contraste regional entre el desarrollo y disponibilidad de agua en México



México tiene una disponibilidad de agua por habitante y por año calificada de media, con 4 312 m³/hab/año, sin embargo este índice es promedio y no refleja las diferencias en disponibilidad en todo el territorio nacional. Esto se puede ejemplificar con dos casos extremos, en el Distrito Federal la disponibilidad es de 188 m³/hab/año y en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, donde la

disponibilidad es de las mayores en el país, se cuenta con 17,254 m³/hab/año. En la figura 3.2 se presenta la disponibilidad media anual *per capita* por región hidrológica.

Fig. 3.2 Disponibilidad media anual *per capita* por región hidrológica



México sostuvo una de las tasas de mayor crecimiento urbano en el ámbito mundial entre 1970 con 4.4% y 1995 con 2.1%, mientras que la media mundial era 2.6 y 2.3%, respectivamente (WRI, 2005). En 1970 la población en la zona urbana era del 59 %, en 1995 ya había subido a 75 %. Esto ha aumentado ampliamente los problemas sociales, alimentarios, de salud y demanda de servicios en dichas zonas. El crecimiento de las zonas urbanas es un factor de vulnerabilidad importante por la dimensión que presenta. Dependiendo del tamaño y de la temperatura promedio del lugar, es la dotación promedio de agua que los sistemas distribuyen en áreas rurales y urbanas (tabla 3.1). Si bien esta dotación es un promedio de muchos sistemas, muestra que el uso de agua se incrementa por la temperatura media de la región (Jiménez, 2001).

Tabla 3.1 Dotación promedio de agua potable en áreas rurales y urbanas

Número de habitantes	Clima m ³ /hab/año		
	cálido	templado	frío
Zonas rurales			
Áreas rurales < 2500	68.4	46.8	25.2
Zonas urbanas			
De 2 500 a 15 000	54	45	36
De 15 000 a 30 000	72	54	45
De 30 000 a 70 000	90	72	63
De 70 000 a 150 000	108	90	72
De 150 000 en adelante	126	108	90

Modificado de: Jiménez, 2001

3.2 Principales Usos del Agua en México

En México, el mayor volumen concesionado para usos consuntivos del agua es el que corresponde a las actividades agrícolas. En la tabla 3.2 se muestra el porcentaje de los tres usos más importantes para diferentes países incluyendo México.

La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año. El valor de la producción directa equivale al 6.5% del PIB nacional. Por otra parte, la población ocupada en este rubro oscila entre los 4 y 5 millones de personas y se estima que dependen directamente de la actividad entre 20 y 25 millones de mexicanos, en su mayoría población rural (CONAGUA, 2008).

Cabe destacar que la superficie de riego del país ha aumentado considerablemente de 750 mil hectáreas en 1926 a 6.4 millones de hectáreas actualmente, lo que coloca al país en el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego. El 54% de la superficie bajo riego corresponde a 85 Distritos de Riego y el 46% restante a más de 39 mil Unidades de Riego (*op.cit.*). La topografía y las condiciones climáticas de México limitan la tierra disponible para el cultivo a unos 23 millones de hectáreas, es decir, al 11.7% de la superficie total del país. A este punto de partida hay que añadir las importantes desigualdades regionales en cuanto a las técnicas de producción y a los rendimientos obtenidos.

Existen grandes diferencias estructurales entre las agriculturas de México y los demás países mencionados en la tabla 3.2, por mencionar dos indicadores que ilustran estas diferencias se seleccionaron en el año 1995: la productividad agrícola por trabajador en Estados Unidos fue de US \$34,727, mientras que para México fue de US \$1,690 y el número de tractores por cada mil trabajadores agrícolas en Estados Unidos fue de 1,452 unidades y en México 20 unidades (Fujii, 2001). Esto pone en evidencia la gran diferencia estructural, que repercute en la productividad, competitividad, eficiencia y finalmente en el aprovechamiento

de los recursos hídricos y explica la proporción del agua disponible que en México se usa para riego.

Tabla 3.2 Usos más relevantes del agua en algunos países

País	Usos del agua (%)		
	Industria	Doméstico	Agricultura
Canadá	80	12	8
Estados Unidos	46	12	42
Alemania	70	10	20
Francia	69	16	15
Inglaterra	77	20	3
México*	9	14	77

Fuente: Magaña y Gay, 2000 * CONAGUA, 2007

Este tipo de análisis revela la diferencia en el uso del agua entre los diversos países con respecto a México, reflejando las diferentes ocupaciones de cada uno así como la importancia de la agricultura de temporal en países templados con mayores precipitaciones a lo largo del año.

3.2.1 Tipo de agua usado en México

En el país se utiliza tanto agua superficial como subterránea para los diversos usos. Por ejemplo, el uso agrícola hace mayor uso de agua superficial que de agua subterránea, ya que el 67% del caudal procede de esa fuente, ver tabla 3.3. Por otro lado, el 62% del agua para abastecimiento público procede de agua subterránea, siendo una fuente más importante que la superficial. La industria, finalmente, utiliza preponderantemente agua superficial, de donde toma 74% del caudal que extrae. A nivel nacional y considerando todo los usos, se emplea más agua superficial que subterránea, de donde se toma el 63% del total, ver tabla 3.3 (CONAGUA, 2008).

Tabla 3.3 Usos del agua en México

Usos del agua (miles de millones de metros cúbicos) en 2007				
Uso	Origen		Volumen	%
	Superficial	Subterráneo		
Agrícola	40.5	20.1	60.6	77
Abastecimiento público	4.2	6.9	11.1	14
Industria autoabastecida	5.3	1.9	7.2	9
Total	50	28.9	78.9	100

Fuente: CONAGUA, 2008

En materia de tratamiento de agua residual municipal se ha avanzado muy poco ya que sólo el 25 % del agua residual es tratada y el 75% restante se descarga cruda a las aguas nacionales (CONAGUA, 2007, Tabla 3.4).

Tabla 3.4 Proporción de agua tratada en el país

Descargas de aguas residuales	km ³ /año	m ³ /s
Aguas residuales municipales generadas	7.66	243
Descarga municipal a alcantarillado	6.53	207
Agua municipal tratada	2.50	79.3
Aguas residuales industriales generada	5.98	189
Agua industrial tratada	0.94	29.9

Fuente: CONAGUA, 2008

3.3 Presión sobre los recursos hídricos

El porcentaje que representa el agua utilizada para todos los usos respecto a la disponibilidad total, es un indicador del grado de presión que se ejerce sobre el recurso hídrico en un país, cuenca o región. De acuerdo con las Naciones Unidas (UNEP, 2004) se considera que si el porcentaje de uso es mayor al 40%, se ejerce una fuerte presión sobre el recurso; entre 20 y 40% es moderado, entre 10 y 20% es baja presión y menor a 10% es nula presión.

Para las autoridades responsables del manejo del agua en el país, un grado de presión del 17%, puede ser considerado como moderado. Sin embargo, la zona centro, norte y noroeste del país experimenta un grado de presión promedio del 71%, lo cual se considera como presión fuerte (Tabla 3.5 y Fig. 3.3) (CONAGUA, 2008).

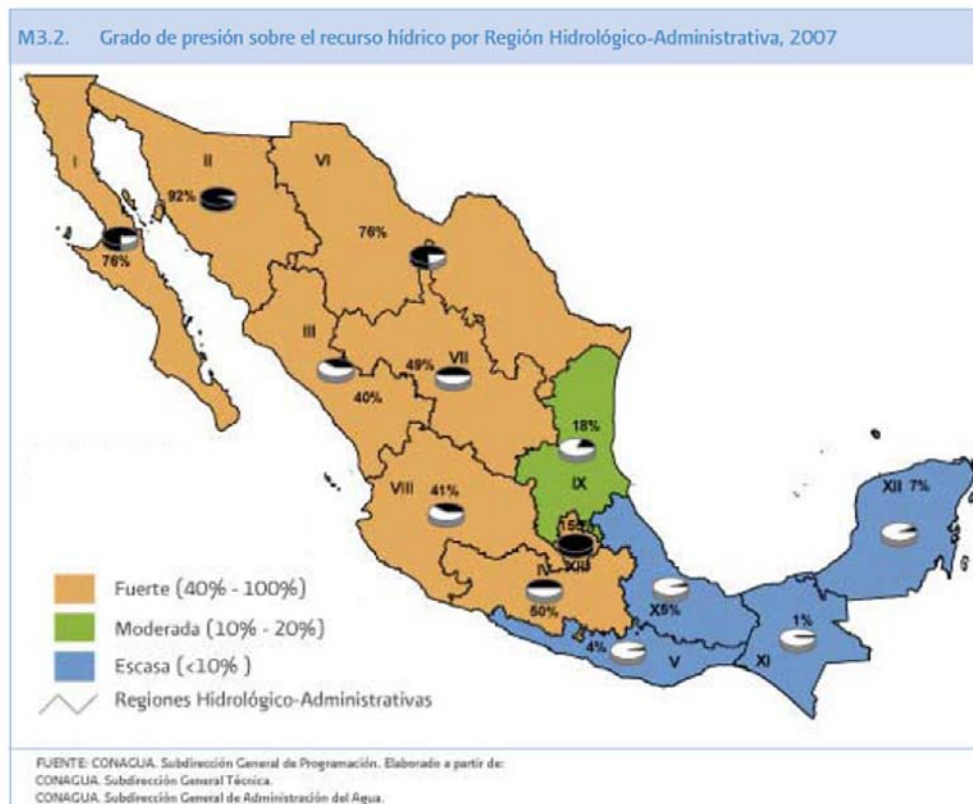
Tabla 3. 5 Grado de presión sobre el recurso hídrico

Región Hidrológico Administrativa	Volumen Total de Agua Concesionado hm ³	Disponibilidad Media Anual hm ³	Grado de Presión Sobre el Recurso Hídrico (%)	Clasificación del Grado de Presión
XIII Aguas del Valle de México	4 642,9	3 009	154	Fuerte
II Noroeste	6 916,8	7 944	87	Fuerte
VI Río Bravo	9 112,4	11 938	76	Fuerte
IV Balsas	10 569,3	21 277	50	Fuerte
I Península de Baja California Cuencas	3 492,6	4 600	76	Fuerte
VII Centrales del Norte	3 807,4	8 394	45	Fuerte
VIII Lerma-Santiago-Pacífico	13 665,7	34 003	40	Fuerte
III Pacífico Norte	10 281,6	25 681	40	Fuerte
IX Golfo Norte	4 587,5	25 619	18	Moderada

XII	Península de Yucatán	1 996,7	29 645	7	Escasa
X	Golfo Centro	4 929,5	102 778	5	Escasa
V	Pacífico Sur	1 279,4	32 496	4	Escasa
XI	Frontera Sur	2 040,4	157 753	1	Escasa
Total		77 322	465 137	16,6	Moderada

Nota: Grado de presión sobre el recurso hídrico = $100x$ (Volumen total de agua concesionado/disponibilidad natural media de agua)
Modificado de CONAGUA (2007)

Fig. 3. 3 Regiones hidrológico-administrativas, donde se representa la presión sobre los recursos hídricos



Se ha tomado el indicador de disponibilidad de agua, propuesto por Falkenmark (1990) y utilizado por las Naciones Unidas que mide la cantidad de agua disponible en un país en función de la población y la califica. Según esta autora, el umbral de un país para satisfacer los requerimientos de agua para la agricultura, la industria, la energía y el medio ambiente es $1\ 700\ m^3$ por habitante/año, cuando desciende a niveles de $1\ 000\ m^3$ por habitante/año, pueden esperarse situaciones de escasez periódica o limitada de agua, y se dice además que un país experimenta tensión hídrica.

Se entiende que la disponibilidad por debajo de los $1\ 000\ m^3$ por habitante/año representa un estado de “escasez de agua crónica”, y por debajo de los 500

metros cúbicos, “escasez de agua absoluta” como lo aceptan otros autores, posteriores a Falkenmark (Hinrichsen *et al.*, 1998).

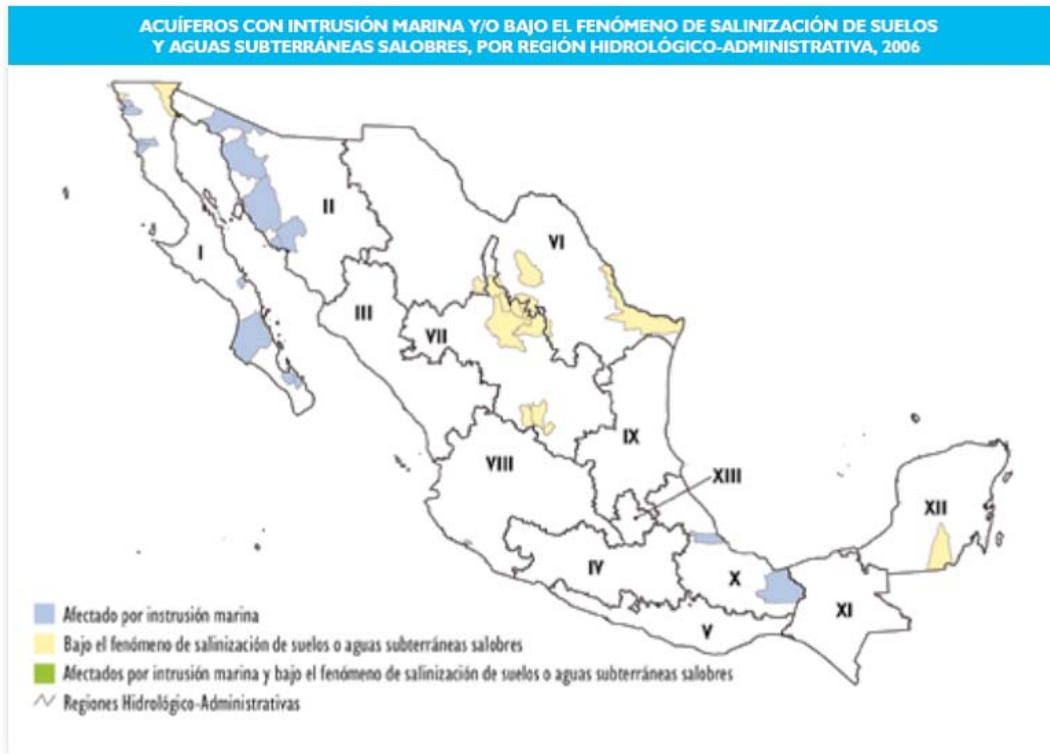
En México a partir de la década de los setentas, ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2006. Sin embargo, en el año 2007 se redujo el número a 101 de acuerdo con información oficial, aunque se desconocen los datos en volumen. De éstos se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos (CONAGUA, 2008). Las regiones hidrológico-administrativas con más acuíferos sobreexplotados son la XIII (100%), II (92%), VI (76%) y I (76%), que se ubican al centro y norte del país e incluyen las zonas más pobladas de la República Mexicana y con una importante participación en el PIB nacional. En la figura 3.4 se pueden observar los acuíferos sobreexplotados del país por región hidrológica (*op. cit.*) y cuya ubicación se encuentra dentro de zonas con mayor desarrollo económico y mayor concentración de la población. Su distribución se relaciona con el marcado contraste entre el desarrollo económico y la disponibilidad del agua de las diferentes regiones del país. Aunado a ello, se tiene un gran rezago respecto a la implementación de tecnologías modernas, adecuadas a las condiciones de cada región del país.

Fig. 3. 4 Acuíferos sobreexplotados del país



En algunas zonas costeras y al norte del país se localizan 34 de los acuíferos afectados por aguas salobres o intrusión marina (Fig. 3.5), en estas áreas se desarrollan principalmente actividades agropecuarias, las cuales han contribuido a la sobreexplotación del recurso hídrico.

Fig. 3. 5 Acuíferos afectados por intrusión marina



FUENTE: Conagua. Subdirección General de Programación. Elaborado a partir de datos de la Subdirección General Técnica.

3.4 Contaminación del Agua

3.4.1 Calidad del agua

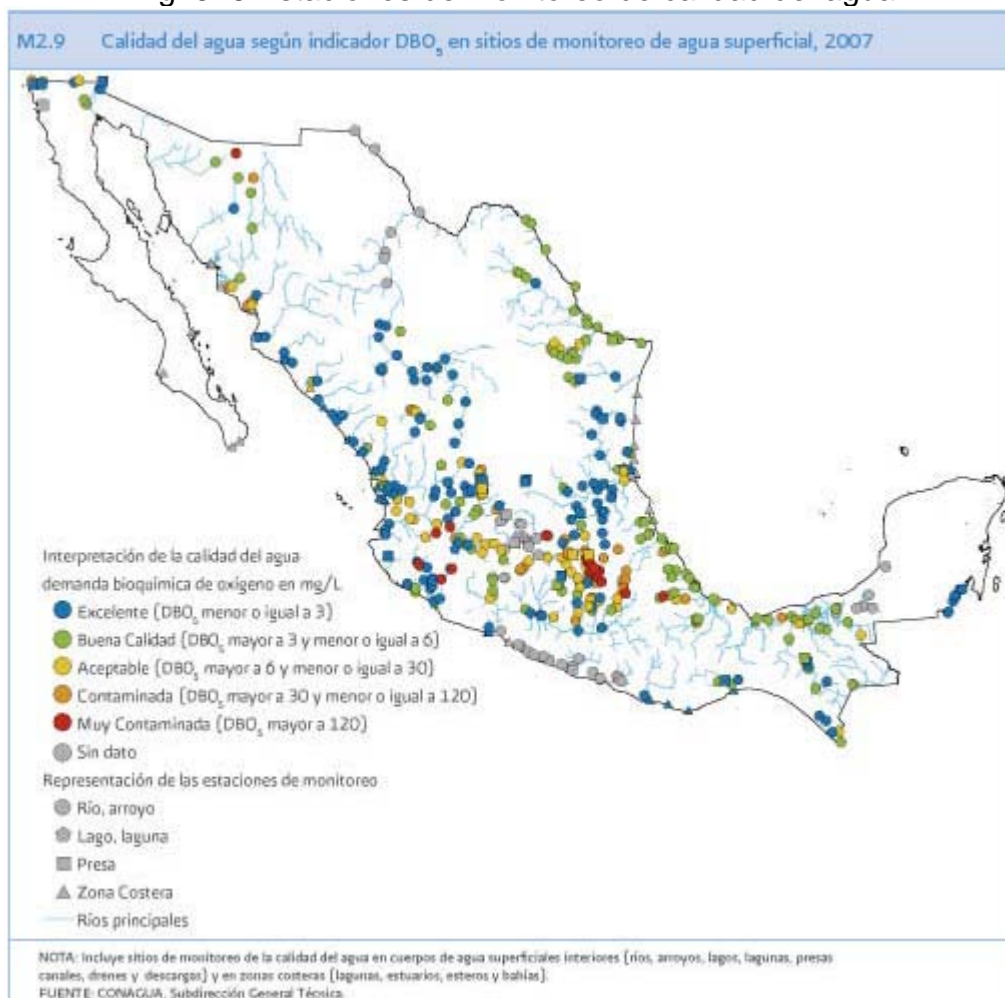
En México existe un gran número cuerpos de agua afectados en su calidad de agua. La CONAGUA realiza una evaluación de la calidad del agua tomando en cuenta tres indicadores, la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO_5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua, provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales de origen municipal y no municipal. La primera determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la segunda mide la cantidad total de materia orgánica químicamente oxidable. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos.

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la

capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. En este sentido, ha sido demostrado que la biodiversidad se encuentra en relación directa con la transparencia del agua. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana, hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa (CONAGUA, 2007).

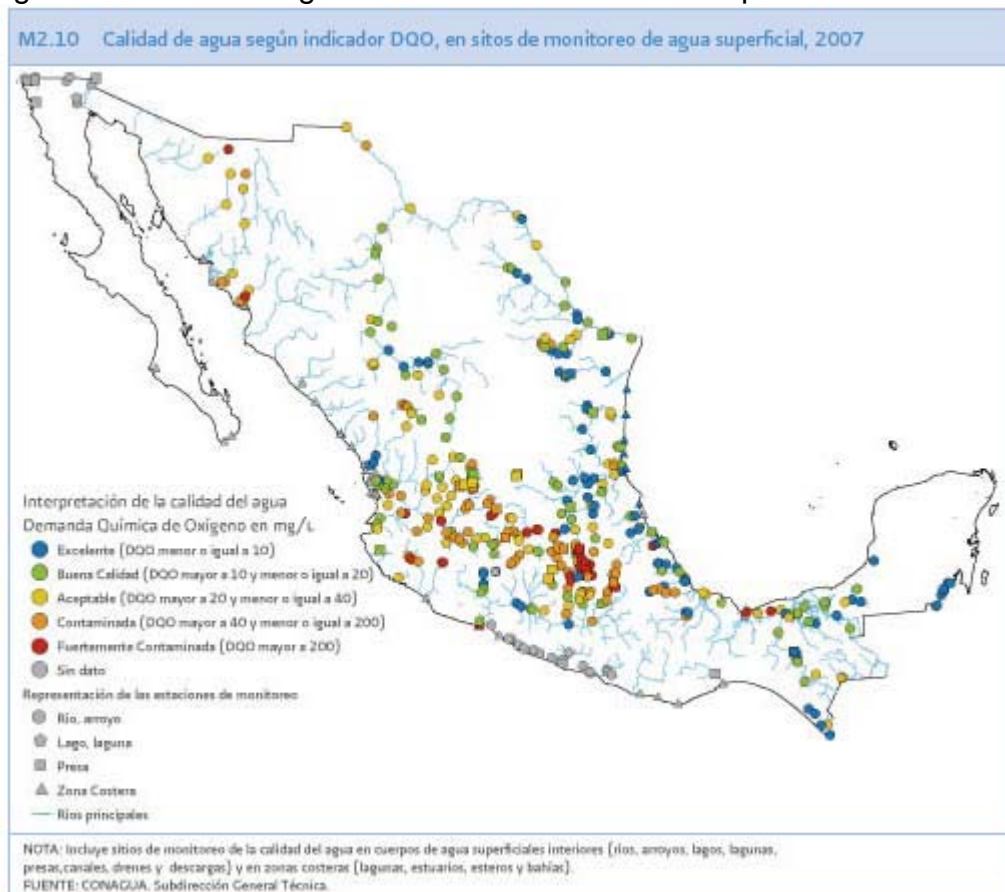
Es importante mencionar que los sitios con monitoreo de calidad del agua están ubicados en zonas con una alta influencia antropogénica. La CONAGUA tenía establecida en 2007 una red nacional de monitoreo que contó con 1 014 sitios, distribuidos a lo largo y ancho del país (CONAGUA, 2008, Fig. 3. 6).

Fig. 3. 6 Estaciones de monitoreo de calidad del agua



Si se evalúa la calidad del agua con base en la DQO, la CONAGUA (2008) señala como contaminadas algunas zonas del país, principalmente las zonas industriales o grandes concentraciones urbanas de Veracruz, Jalisco, Guanajuato, Puebla, Distrito Federal, México, Tlaxcala, Michoacán, Sonora y Sinaloa (ver Fig. 3.7).

Fig. 3. 7 Calidad del agua de los recursos hídricos superficiales de México

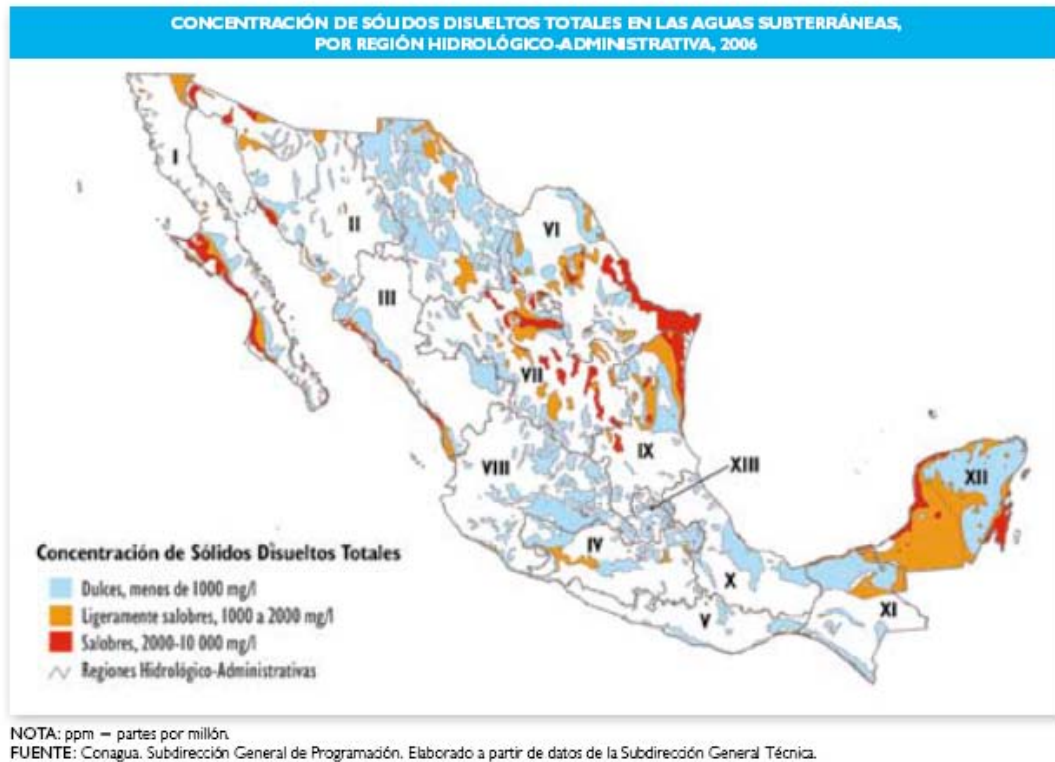


3.4.2 Calidad del agua subterránea

Uno de los parámetros que permite evaluar la calidad de las aguas subterráneas es el grado de salinización, que se mide como sólidos disueltos totales. En la Fig. 3.8 se muestra la distribución de la calidad del agua subterránea, expresada en concentración de sólidos disueltos totales (SDT), en miligramos por litro (mg/l). De acuerdo con su concentración, las aguas subterráneas se clasifican en *dulces* (<1 000 mg/L), *ligeramente salobres* (1000-2000 mg/L), *salobres* (2 000-10 000 mg/L) y *salinas* (>10 000 mg/L) (CONAGUA, 2007).

El límite entre el agua dulce y la ligeramente salobre coincide con la concentración máxima señalada por la modificación de la norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994 Salud ambiental, agua para uso y consumo humano- Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

Fig. 3. 8 Concentración de SDT en aguas subterráneas por región hidrológica



3.4.3 Fenómenos meteorológicos

Los ciclones tropicales son fenómenos meteorológicos que inciden directamente en el clima de una extensa área del país, a ellos se debe el gran porcentaje de humedad proveniente del mar hacia el territorio nacional. Las lluvias asociadas con estos fenómenos generan la mayor cantidad de precipitación pluvial anual dado que los principales climas del país están caracterizados por lluvias abundantes en verano y nula o escasa lluvia invernal (CONAGUA, 2008). En los últimos años se han producido inundaciones de importantes ciudades en diferentes estados, por ejemplo, en Quintana Roo en 2006, Tabasco en 2007, Querétaro, Guanajuato, Chihuahua en 2008, producto todas ellas de intensas lluvias que muestran el alto grado de vulnerabilidad, de muchas ciudades, donde la calidad del agua para consumo humano es seriamente comprometida durante el evento (*op. cit.*). No debe pensarse que las inundaciones son producto directo del cambio climático. Más bien obedecen al cúmulo de factores concurrentes como cambios en el régimen de lluvias, uso de suelo, deforestación y en la humedad de suelo, cambios antropogénicos en la hidrología de los sistemas, urbanización, falta de planeación en el crecimiento urbano, asentamientos humanos en sitios no aptos, entre otros (Simonovic y Li, 2003). La presencia de inundaciones y eventos meteorológicos extremos inciden en la calidad del agua, como se ha demostrado en inundaciones en diversas partes del mundo, lo que se analiza con mayor detalle en el capítulo de Salud.

3.5 Evaluación de la vulnerabilidad del abastecimiento de agua en México ante el cambio climático

De acuerdo con los factores descritos, los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua para la población pueden ser positivos o negativos, dependiendo de las condiciones de uso del agua en cada región del país.

Como un primer paso para la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico en México, en el presente estudio se conjuntaron los factores de disponibilidad, proporción y distribución del uso y presión sobre el recurso, así como de contaminación de agua subterránea y superficial para cada región hidrológica, ver tabla 3.6. En el sentido de la disponibilidad de agua, hay una relación entre calidad y cantidad que va más allá de ésta, en virtud de que puede haber escasez de agua de calidad elevada, en una región de alta disponibilidad de agua de calidad pobre, como es el agua contaminada. Lo opuesto es tener agua de alta calidad que cumple con creces las especificaciones necesarias pero que no es suficiente. De esta manera, los factores cantidad y calidad en este análisis son complementarios. En este estudio se ordenaron las regiones acordes al grado de mayor abuso en el recurso hídrico. La región hidrológica II Noroeste, por ejemplo, es la que presenta mayor grado de presión sobre sus recursos hídricos, tanto por cantidad como por calidad. En la región confluyen fuerte presión, sobreexplotación e intrusión salina o salinización de suelos, así como contaminación de agua superficial y subterránea moderadas. Sin embargo, estos factores están presentados sin el efecto que se espera del cambio climático, esto es, como un escenario base, o una fotografía del estado actual, previo a los efectos causados por el cambio climático. Si bien los impactos del cambio climático pueden ser múltiples, sólo se evaluaron los directamente relacionados con el incremento de la temperatura y la reducción de la precipitación.

Tabla 3.6. Grado de uso de los cuerpos de agua por regiones hidrológicas, condición actual

Región Hidrológica administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación	
				Subterránea	Superficial
II Noroeste	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Moderado	Moderado
VI Río Bravo	Fuerte	Fuerte	Moderado	Fuerte	Moderado
XIII Valle de México	Extremo	Fuerte	Escaso	Escaso	Fuerte
VII Cuencas Centrales del N	Fuerte	Fuerte	Moderado	Fuerte	Escaso
I Baja California	Fuerte	Moderado	Fuerte	Moderado	Escaso
VIII Lerma-Santiago- Pacífico	Fuerte	Fuerte	Escaso	Escaso	Fuerte
IV Balsas	Fuerte	Moderado	Escaso	Escaso	Fuerte

III Pacífico Norte	Fuerte	Escaso	Escaso	Moderado	Escaso
IX Golfo Norte	Moderada	Escaso	Escaso	Moderado	Moderado
X Golfo Centro	Escasa	Escaso	Moderado	Escaso	Moderado
XII Península de Yucatán	Escasa	Escaso	Escaso	Fuerte	Na
V Pacífico Sur	Escasa	Escaso	Escaso	Escaso	Escaso
XI Frontera Sur	Escasa	Escaso	Escaso	Escaso	Escaso

Posteriormente y para desarrollar un índice de vulnerabilidad que ayude a identificar la potencial situación del recurso hídrico en las próximas décadas, se siguió un paralelo a la metodología de Ávila (2002), con inclusión de variables como cambio en la temperatura media anual y % de cambio en la precipitación, bajo cambio climático, distintas a las utilizadas por dicho autor. El índice se construyó como un promedio de los factores mostrados en la tabla 3.6, asignando un mismo peso equivalente a cada uno de ellos. Se mantuvo como hipótesis que las condiciones de dichos factores permanecerán constantes para las próximas décadas, con un perfil similar a una condición actual.

Los factores correspondientes a temperatura y precipitación se obtuvieron del análisis de los escenarios de cambio climático regionalizados para México (50Km²), considerando los SRES A2 y A1B, con las proyecciones para los periodos 2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099, referidas como climatologías 2020s, 2050s y 2080s, respectivamente, (Magaña y Caetano, 2007), ver tabla A.1 del anexo 1. Se promedió el resultado de los escenarios para cada región hidrológica, a partir de los mapas de escenarios para cada una de las climatologías descritas. Siguiendo con el análisis, para la Región Hidrológica II Noroeste, los promedios por región muestran que la precipitación anual disminuirá 16, 17 y 22% (tabla 3.7), así como se incrementará la temperatura en 0,7°, 1,9° y 3,0°C para las climatologías 2020s, 2050s y 2080s bajo el escenario A2 (tabla 3.8). En el caso del escenario A1B, se prevé que el cambio climático reducirá la precipitación anual en esa región en 11, 15 y 22 % y la temperatura se verá incrementada en 0,8, 1,8 y 2,6°C, respectivamente.

Tabla 3.7. Reducción de precipitación por región hidrológica, según los escenarios A2 y A1B, % anual, para tres climatologías (modificado de Magaña y Caetano, 2007)

Zona administrativa	Escenario A2			Escenario A1B		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
I. Baja California	-22%	-25%	-31%	-18%	-22%	-25%
II. Noroeste	-16%	-17%	-22%	-11%	-15%	-16%
III. Pacífico Norte	-11%	-13%	-15%	-9%	-11%	-12%
IV. Balsas	-18%	-22%	-26%	-14%	-14%	-15%
V. Pacífico Sur	-11%	-12%	-14%	-10%	-9%	-11%
VI. Río Bravo	-15%	-16%	-18%	-14%	-15%	-15%
VII. Cuencas Centrales del Norte	-11%	-13%	-15%	-10%	-11%	-11%
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	-11%	-12%	-13%	-8%	-14%	-10%
IX. Golfo Norte	-14%	-16%	-17%	-13%	-10%	-12%
X. Golfo Centro	-13%	-15%	-16%	-11%	-10%	-12%
XI. Frontera Sur	-6%	-8%	-9%	-5%	-4%	-6%
XII. Península de Yucatán	-13%	-14%	-16%	-10%	-11%	-12%
XIII. Valle de México	-11%	-11%	-15%	-10%	-8%	-10%

Una vez calculada la variación en temperatura y cambio en la precipitación (%) para cada región hidrológica y escenario de cambio climático (A2 y A1B), se asignó un valor a cada factor. En el caso de calificaciones cualitativas (tabla 3.6), se asignaron valores entre uno y cuatro para cada calificación, esto es, al calificativo de escaso se le asignó un valor de uno, al calificativo de moderado se le asignó un valor de dos, para el calificativo de fuerte se le asignó un valor de tres y para el calificativo de extremo se asignó un valor de cuatro.

Tabla 3.8. Incremento en la temperatura por región hidrológica, según los escenarios A2 y A1B, °C, para tres climatologías (modificado de Magaña y Caetano, 2007)

Zona administrativa	Escenario A2			Escenario A1B		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
I. Baja California	+ 0.6	+ 2.0	+ 3.0	+ 0.9	+ 1.8	+ 2.7
II. Noroeste	+ 0.7	+ 1.9	+ 3.0	+ 0.8	+ 1.8	+2.6
III. Pacífico Norte	+ 0.8	+ 2.4	+ 3.2	+ 0.9	+ 1.9	+2.8
IV. Balsas	+ 0.5	+ 1.8	+ 2.6	+ 0.7	+ 1.5	+2.3
V. Pacífico Sur	+ 0.5	+ 1.7	+ 2.6	+ 0.6	+1.5	+2.2
VI. Río Bravo	+ 0.6	+ 2.0	+ 2.9	+ 0.7	+1.6	+2.5
VII. Cuencas Centrales del Norte	+ 0.6	+ 2.0	+ 2.9	+ 0.7	+1.6	+2.4
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	+ 0.6	+ 1.7	+ 2.8	+ 0.7	+1.6	+2.4
IX. Golfo Norte	+ 0.5	+ 1.6	+ 2.5	+ 0.6	+ 1.5	+2.2
X. Golfo Centro	+ 0.5	+ 1.6	+ 2.5	+ 0.6	+1.5	+2.2
XI. Frontera Sur	+ 0.7	+ 1.5	+ 2.5	+0.5	+1.4	+2.1
XII. Península de Yucatán	+ 0.5	+ 1.5	+ 2.5	+ 0.5	+1.4	+2.1
XIII. Valle de México	+ 0.5	+ 1.7	+ 2.6	+ 0.6	+1.5	+2.2

Para el incremento de temperatura, a los valores obtenidos (tabla 3.8) se les asignó un valor de 1, 2 y 3, según los rangos 0.1-1.0, 1.1-2.0 y 2.1-3.0, respectivamente, lo que corresponde al incremento de temperatura máximo esperado y considerado por el IPCC como de modificaciones irreversibles y de difícil manejo (2007). Para el cambio en la precipitación, las variaciones esperadas entre 0 y -31% fueron distribuidas igualmente entre rangos de 0 a -10, -11 a -20 y -21 a -30 a los que se asignaron valores de 1, 2 y 3 puntos, respectivamente (Tabla 3.7).

Se promediaron los valores asignados a cada uno de los parámetros evaluados, por región hidrológica. Volviendo al ejemplo, para la Región Hidrológica II Noroeste se obtuvo un promedio de 2.3 puntos para la climatología 2020s y el escenario A1B, ver tabla 3.9. Los cálculos de otros escenarios y climatologías se incluyen en el anexo 1, tablas A2-A6.

Tabla 3.9. Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2020s y escenario A1B

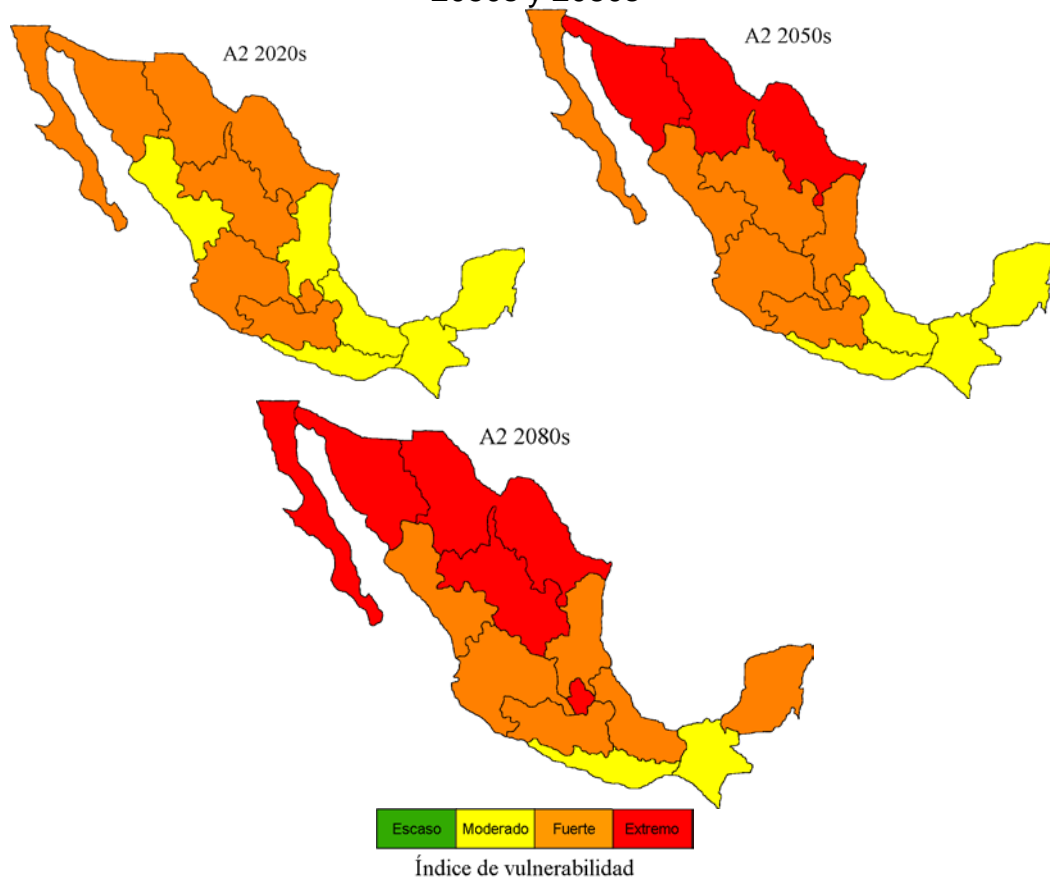
Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	2	1	2.28
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	1	2.28
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	1	1	2
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	1	1	2
I. Baja California	3	2	3	2	1	2	1	2
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	1	1	1.85
IV. Balsas	3	2	1	1	3	2	1	1.85
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	1	1	1.42
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	2	1	1.57
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	2	1	1.42
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		1	1	1.16
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	1	1	1
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	1	1

A partir de esa información se elaboraron los mapas del índice de vulnerabilidad de los cuerpos de agua por escenario, en la que se asignaron cuatro niveles de colores para el abanico de calificaciones posibles. Se procedió similarmente para las diferentes climatologías y escenarios, mismos que sirvieron de base para elaborar los mapas del índice de vulnerabilidad por escenario A2 y A1B, así como para las climatologías 2020s, 2050s y 2080s, ver figs. 3.9 y 3.10.

En el escenario A2, las regiones más vulnerables, de acuerdo al índice propuesto en el estudio, se encuentran al norte de la República como son la Noroeste y la Río Bravo, que desde el escenario de la climatología 2050s muestran un grado de vulnerabilidad definido como extremo. Otras regiones como Cuencas Centrales, Baja California y Valle de México incrementan el grado del índice de vulnerabilidad, pasando a ser extremo hacia el fin de siglo. Para las regiones Lerma- Santiago-Pacífico y Balsas, debido a que el incremento de la temperatura es moderado, el índice de vulnerabilidad permanece en un nivel calificado como fuerte entre las climatologías 2050s y 2080s. Las regiones Golfo Norte, Golfo

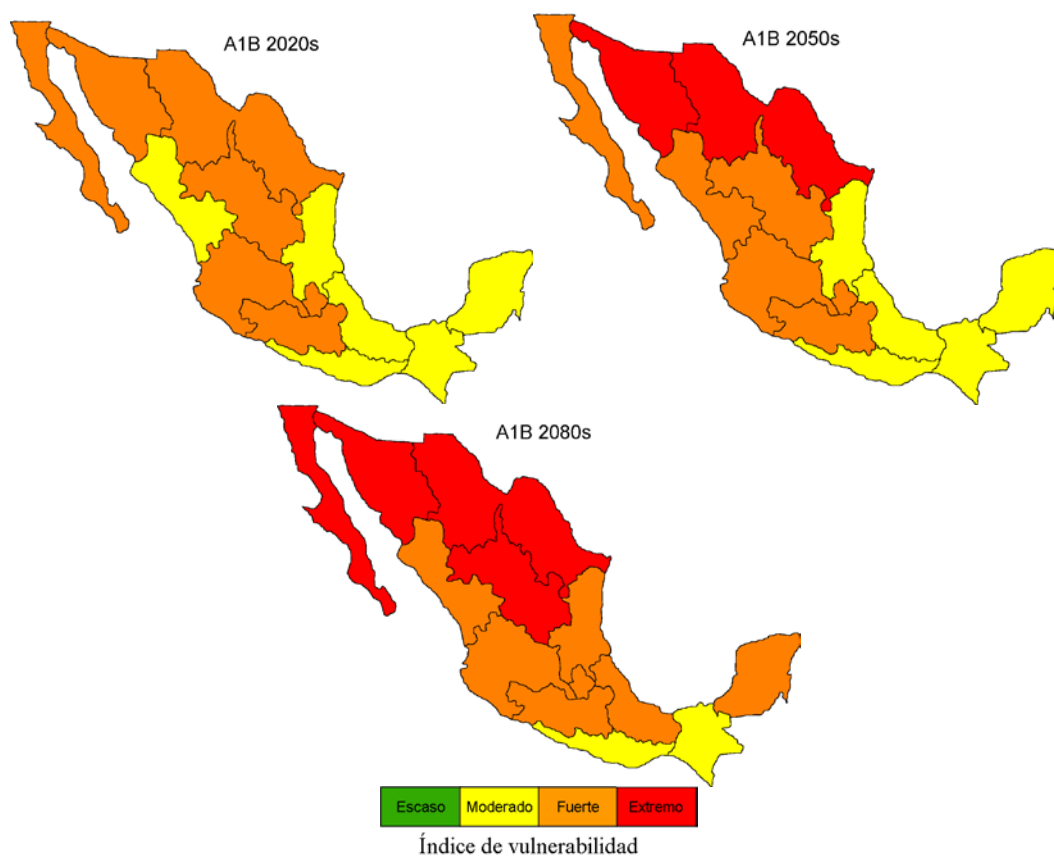
Centro, Yucatán y Pacífico Norte incrementan el valor del índice de vulnerabilidad de nivel medio a fuerte hacia el fin de siglo. En menor grado se verán afectadas las regiones Pacífico Sur y Frontera Sur, que tienen abundantes recursos hídricos.

Fig. 3.9 Índice de vulnerabilidad por cantidad y calidad de agua por región hidrológica administrativa para el escenario A2, para tres climatologías, 2020s, 2050s y 2080s



En el escenario A1B, las regiones que presentan mayores valores en el índice de vulnerabilidad son la Noroeste y la Río Bravo, que en el escenario de la climatología 2050s muestran un grado del índice de vulnerabilidad calificado como extremo. Las regiones Cuencas Centrales y Baja California incrementan el índice de vulnerabilidad al grado extremo hacia fines del siglo XXI. Para las regiones Lerma- Santiago-Pacífico y Balsas, los valores del índice de vulnerabilidad permanece en un nivel de fuerte entre las climatologías 2020s y 2080s, debido a que el incremento de la temperatura es moderado. En la región Pacífico Norte crece el índice de vulnerabilidad de medio a fuerte a partir de la climatología 2050s. Las regiones Golfo Norte, Golfo Centro y Yucatán incrementan los valores del índice de vulnerabilidad, de nivel medio a fuerte hacia el fin de siglo. En menor grado se verán afectadas las regiones Pacífico Sur y Frontera Sur.

Fig. 3.10 Índice de vulnerabilidad por cantidad y calidad de agua por región hidrológica administrativa para el escenario A1B, para tres climatologías 2020s, 2050s y 2080s



Otras consideraciones deben ser tomadas en cuenta para la ponderación de estos resultados, principalmente las relacionadas con el desarrollo socioeconómico y con la aplicación de medidas de adaptación. Ante un incremento de la temperatura ambiente se espera un aumento en el volumen de agua usado por la población. El pronóstico de menor precipitación en esta región, incrementaría la extracción de aguas subterráneas, por lo tanto esto provocaría una mayor presión sobre el recurso. Como se mostró en la tabla 3.1, el incremento en el uso del agua relacionado con el aumento en la temperatura puede ser cercano al 40%, lo que implica un incremento en la demanda, que a su vez repercute en la presión sobre los recursos hídricos y en la vulnerabilidad de las regiones hidrológicas a la escasez de agua.

Se aclara que no se realizaron proyecciones de cambio en la calidad del agua para los diferentes escenarios. En el capítulo anterior se analizaron las posibles repercusiones del cambio climático en la calidad del agua. Sin embargo, no se cuenta con suficiente información que permita realizar proyecciones del cambio en calidad del agua relacionado con dicho fenómeno. Por ejemplo, no se analiza el efecto que tendría un incremento en el saneamiento del agua, meta que se

contempla en el programa del gobierno 2007-2012, así como tampoco se analiza cómo influiría este factor particular en otros de los temas incluidos en el análisis.

Referencias bibliográficas:

- Ávila P. 2002. Cambio Global y Recursos Hídricos en México: hidropolítica y conflictos contemporáneos por el agua. Instituto Nacional de Ecología. Proyecto INE/ADE 045/2002. 107 pp
- CONAGUA 2007. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales Eds. Rodríguez, T. J., Jaimes, M. O. México, 263 pp.
- CONAGUA 2008. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua-Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ed. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 233 pp
- Falkenmark M. 1990. Population growth and water supplies. An emerging crisis. *People* **17** (1): 18-20 pp.
- Fujii G. 2001. Apertura comercial y empleo agrícola en México. *Momento Económico* Num. 115, mayo-junio de 2001. 45-56 pp.
- Hinrichsen D., B. Robey y U.D. Upodhyay. 1998. Soluciones para un mundo con escasez de agua. *Population Reports. Serie M* No. 14 Baltimore John Hopkins School of Public Health. Population Information Program. 1-61 pp.
- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jiménez C. B. 2001. La Contaminación ambiental en México, causas, efectos y tecnología apropiada. Instituto de Ingeniería UNAM. Ed. Limusa FEMSA y Colegio de Ingenieros Ambientales de México A.C. 154 pp.
- Kauffer M. E. 2006. México La frontera Sur y la crisis del Agua. *Ecofronteras, de nuestro pozo.* 2-5pp.
- Magaña O.V. 2008. Mapas elaborados para los escenarios A2 y A1B, propuestos por el IPCC, que muestran proyecciones para las climatologías 2020s, 2050s y 2080s. Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM.
- Magaña O.V. y E. Caetano. 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. Instituto Nacional de Ecología – SEMARNAT. Disponible en: <http://www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/e2007o.pdf>
- NOM-127-SSA1-1994. Norma Oficial Mexicana "Salud Ambiental, Agua Para Uso y Consumo Humano-Límites Permisibles de Calidad y Tratamientos A que debe someterse el agua para su potabilizacion".
- Simonovic S.P. y L. Li. 2003. Methodology for Assessment of Climate Change Impacts on Large-Scale Flood Protection System. *J of Water Res and Plann Management.* 129, 5, 361-371.
- United Nations Environmental Program. 2004. Vital Water Graphics upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/3874/1/55711-1.pdf – Fecha de consulta: 12/08/08.
- World Resources Institute. 2005. Tomado de: World Urbanization Prospects: The 2005 Revision. Urban and Rural Areas Dataset.

4 Sector turismo

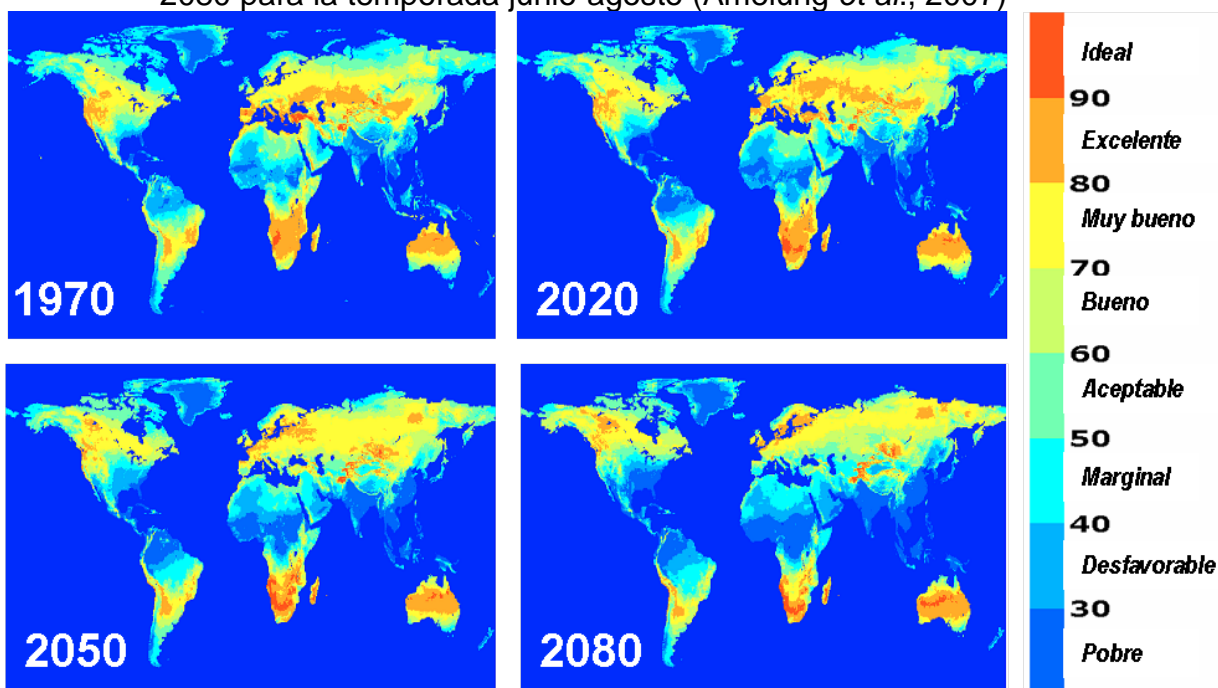
El turismo se ha convertido en la mayor industria del mundo en términos de número de empleados pues contrata 250 millones de personas (uno de cada nueve) y genera cerca del 11% del PIB mundial. En Europa es el segundo rubro en el gasto de los habitantes, tras la alimentación con 13% del gasto de consumo. El turismo tiene claras repercusiones positivas además de la creación de empleos, como el incremento de ingresos económicos, la reducción de migraciones al mejorar el nivel cultural de la población local y la apertura a costumbres más libres, el intercambio cultural, la mejora del modo de vida, y la protección del ambiente y otros. Sin embargo, las consecuencias negativas son importantes, entre las que se cuentan incremento en el uso de suelo, agua y energía, la destrucción de paisajes, el aumento en la producción de residuos sólidos y agua residual, la alteración de ecosistemas, la introducción de especies exóticas de animales y plantas, la inducción de flujos de población hacia poblaciones turísticas, el aumento de incendios forestales, el tráfico de personas y las drogas, el desarrollo turístico en zonas inadecuadas y la contribución al cambio climático (5% de las emisiones) (Vilches *et al.*, 2008). Sin embargo, es una industria caracterizada por cambios de preferencias, en función de factores como estabilidad política, precios, moda y tendencias sociales. En México desde 2005 se observa una tendencia clara a la declinación del número de visitantes, del turismo fronterizo, pero un incremento de los turistas internos. La derrama económica en el país fue de 8,475 millones de dólares en el primer semestre de 2008, con un incremento de 23% a lo largo de los últimos 5 años, a pesar de la inseguridad y otros factores que han tenido un impacto negativo sobre esta actividad (SECTUR, 2008). Sin embargo, el cambio climático puede tener implicaciones mayores para la industria turística, por ejemplo disminuyendo el atractivo de áreas populares y mejorando las características de otros sitios.

4.1 Clima y turismo

Las condiciones climáticas influyen dónde se elige ir de vacaciones, cuándo ir y que actividades formarán parte en el destino elegido. A pesar de que es poco común encontrar estudios sobre clima y turismo, las estadísticas sobre turismo no incluyen este factor dentro de sus análisis o resulta ser un factor insignificante (Barry y O'Hagan, 1972). Maddison (1998) profundizó en el tema y concluye que la temperatura considerada como óptima para los europeos es de 25°C, como promedio del día, con una desviación estándar de 3°C. Si bien los turistas prefieren los lugares sin precipitación, no hay un óptimo claro de cantidad de lluvia. En cuanto al turismo de playa, la preferencia diverge hacia la presencia de la misma así como al tipo de playa, más que al tipo de clima en ella. Otros factores que atraen la demanda son países grandes, la presencia de variados servicios disponibles, así como países con ingreso *per capita* elevado y con costas prolongadas.

Se ha desarrollado un índice de confort del turismo o TCI (por sus siglas en inglés), para medir y comparar regional o localmente los sitios turísticos. Actualmente, se usa una versión actualizada por Amelung y Viner de este índice (2005). El TCI usa la temperatura media, la temperatura máxima, la humedad mínima relativa diaria, la humedad media relativa diaria, la precipitación, horas de sol y el viento para un cierto día, mes o temporada. Al parecer temperaturas mayores a 35°C son fácilmente clasificadas con pérdida de confort y si se combina con alta humedad, mayor es la pérdida de aceptación. Amelung *et al.* (2007) analizaron la diferencia en confort para el siglo XXI en la temporada de verano y concluyeron que en Norteamérica, en el mes de julio, Canadá es el más beneficiado por el cambio climático, con índices de confort superiores a 80% en su territorio, mismos que no se detectan en México ni en Estados Unidos. En general se presenta un corrimiento de las zonas de confort hacia el norte, hacia territorio canadiense. Con ello disminuye el déficit en la balanza comercial que presenta por concepto de turismo (Figura 4.1). Estas modelaciones se hicieron con base en los escenarios socioeconómicos A1 planteado por el IPCC.

Fig. 4.1 Índice de confort climático en la actividad turística de 1970, 2020, 2050 y 2080 para la temporada junio-agosto (Amelung *et al.*, 2007)



Lise y Tol (2002) encontraron para Gran Bretaña que el turismo económico ha perdido popularidad, mientras que el turismo deportivo ha incrementado su presencia. Otro hallazgo es que las actividades favoritas del turista son independientes del clima ya que la selección del lugar se hace en función de las actividades que se desea desarrollar, lo que de manera indirecta incluye la selección del sitio y su clima. Dado el calentamiento del planeta, se esperaría que este induzca en los turistas a buscar diferentes destinos y cambios en la temporalidad del viaje. Es muy probable que el cambio climático ocasione cambios

en el comportamiento del turista típico. Si bien los turistas y los operadores de turismo son adaptables a los cambios, no puede decirse lo mismo de los proveedores locales y las economías locales dependientes del turismo. Para ellos, el atractivo de su región cambiará sin control de su parte, lo que puede ser muy negativo para regiones con pocas alternativas de turismo y con una cultura de inmovilidad.

4.2 Turismo y calidad del agua

La relación de estos conceptos presenta varias vertientes. Por un lado, el cambio climático pone en riesgo al ambiente, por afectaciones al incrementarse la temperatura y afectar la biodiversidad. Estos cambios también influyen en la percepción que el turista tiene sobre el sitio que visita. Otras afectaciones están relacionadas con la calidad microbiológica de los cuerpos de agua, muy importante en el turismo de playa, pero también para la producción de alimentos del mar. Louis y colaboradores (2003) demostraron que ya existe una mayor presencia y resistencia de *Vibrio cholerae* en las zonas costeras, como resultado del incremento en la temperatura de los cuerpos de agua costeros. La presencia de eventos meteorológicos extremos trae consigo un deterioro de la calidad del agua potable que se distribuye en los sistemas, que tienen dificultades técnicas para enfrentar este tipo de emergencias por inundaciones de los propios sistemas de distribución. La Organización Mundial de la Salud ha detectado ya esta problemática como un punto focal por enfrentar dentro de las medidas de adaptación (OMS, 2008).

En el caso de países que dependen del atractivo turístico del ambiente, se ha visto un impacto significativo. La Gran Barrera de Arrecife en Queensland, Australia, contribuye con cinco billones de dólares al año a la economía de la nación gracias a los dos millones de turistas que visitan la región. Sin embargo, la Gran Barrera de Arrecife, los arrecifes del Caribe y los de las costas africanas, han sufrido una rápida destrucción. La concentración de bióxido de carbono alcanzado en la atmósfera, conduce a un decremento en el pH de las aguas oceánicas, proceso que induce el blanqueamiento de los corales, junto con el calentamiento de las aguas. Se estima que un incremento de 2°C en la temperatura superficial podría matar al 90% de todos los arrecifes del mundo. Un ejemplo de lo anterior es el fenómeno de blanqueamiento de corales sucedido durante El Niño (1997/98), por el cual se perdió el 30% de los corales de la costa del este africano y redujo el turismo en Mombasa y Zanzíbar produciendo pérdidas de 12 a 18 millones de dólares (Strachan, 2008).

4.3 Problemática en México

En la República Mexicana, el mayor número de visitas las recibe la Ciudad de México, seguido del turismo denominado de sol y playa, con destinos como Cancún, Los Cabos, Puerto Vallarta, Acapulco, Mérida, Mazatlán, Cozumel e Ixtapa. El país cuenta con 10,000 km de costas, lo que le ha dado un lugar

privilegiado para este tipo de turismo. Ortiz y Méndez (2005) identificaron cinco zonas en la costa del Atlántico donde ya se presentan condiciones críticas por un posible cambio en el nivel del mar: Llanura deltaica del río Bravo, Laguna de Alvarado, Complejo deltaico tabasqueño, Los Petenes y las Bahías de Sain Ka'an-Chetumal. De este análisis no se desprenden zonas turísticas en riesgo, más bien su importancia es ambiental, en biodiversidad y en mayor riesgo de inundaciones, que ponen en riesgo otro tipo de recursos. La susceptibilidad al incremento del nivel del mar es más alta en el Atlántico que en el Pacífico, por el tipo de costa y los fenómenos morfológicos relacionados. Se calcula que la costa de la península de Yucatán, Tabasco, Veracruz, Tamaulipas, el Istmo de Tehuantepec y la costa en Nayarit pueden sufrir un retroceso de manglares, playa, y pérdida de biodiversidad por un cambio en el nivel del mar (Martínez, 2005).

Para el turismo actual, se teme pérdida de playa en zonas como el Caribe mexicano, así como de arrecifes coralinos, mismas que ya han sido observadas por los fenómenos meteorológicos recientes (Salazar-Vallejo, 2002). En el puerto de Veracruz la infraestructura está en riesgo así como las fuentes de abastecimiento de agua porque ya presentan intrusión salina. En Nayarit se tienen proyectos de inversión cuantiosa para nuevos destinos turísticos, misma que puede verse comprometida si el factor de cambio climático no es tomado en cuenta. Existen dos proyectos de gran envergadura, uno en Nayarit y otro en Sinaloa, que pretenden convertirse en polos de desarrollo turístico, como lo fueron Huatulco y Cancún. Ambos proyectos hacen uso de la playa para construcciones, sin tomar en consideración un cambio de nivel del mar, por ejemplo de un metro de incremento, ver figura 4.2 (FONATUR, 2008). Esto ya ha sido cuestionado por los estudiosos del cambio climático y expertos en urbanismo (Jacob, 2008).

Fig. 4.2 Desarrollo turístico en Nayarit (FONATUR, 2008)



El Programa Playas Limpias ha generado información sobre la calidad del agua en las playas más visitadas de cada entidad del país (CONAGUA, 2008). Para anticipar los impactos y tener mejores medidas de adaptación en este sector, se requiere que se implementen sistemas de modelación por cuencas, donde converjan las características fisiográficas, más los impactos por asentamientos humanos. Esto permitiría determinar con menor incertidumbre el tipo y magnitud de los impactos.

En capítulos siguientes se presenta una primera aproximación sobre los impactos económicos que el sector puede enfrentar por consecuencias del cambio climático y en otro se proponen medidas de adaptación que el sector turismo debería analizar para iniciar un plan nacional en este sentido.

Referencias bibliográficas:

- Amelung B. y D. Viner. 2005. Mediterranean Tourism: Exploring the Future with the Tourism Climatic Index. *J Sust Tourism*. 14, 4, 349-366.
- Amelung B., S. Nicholls y D. Viner. 2007. Implications of Global Climate Change for Tourism flows and Seasonality. *Journal of Travel Research*. 45: 285-296.
- Barry K. y J. O'Hagan. 1972. An Econometric Study of British Tourist Expenditure in Ireland. *Econom. Soc. Rev.* 3, 143-161.
- CONAGUA. 2008. Estadísticas del Agua en México. SEMARNAT. 233 pp.
- FONATUR. 2008. Comunicado de Prensa. Boletín 16. En: http://www.fonatur.gob.mx/es/comun_prensa/comunicados_prensa.asp Consultado el: 17/10/2008.
- Jacob J. 2008. ¿El cambio climático afectará el desarrollo social y la calidad de vida en las costas? Segundo Panel internacional sobre cambio climático: La zona costera y su impacto ecológico, económico y social. INECOL, Xalapa, Ver. 16 de octubre.
- Lise W. y R.S.J. Tol. 2002. Impact of Climate on Tourism Demand. *Climatic Change* 55, 429-449.
- Louis V.R., E. Russek-Cohen, N. Choopun, I. N.G. Rivera, B. Gangle, S.C. Jiang, A. Rubin, J. A. Patz, A. Huq y R.R. Colwell. 2003. Predictability of *Vibrio cholerae* in Chesapeake Bay. *J. App. And Env. Microbiology*, 69, 5, 2773-2785.

- Maddison D.J. 1998. In Search of Warmer Climates: The Impact of Climate Change on Flows of British Tourists. University of Strathclyde. Strathclyde. 129-157 pp.
- Martínez J. 2005. Efectos del Cambio Climático en México. En: ABC de Cambio Climático: Impactos y Acciones en México. Fecha de consulta: 13/10/200/ http://www.portal.sre.mx/uaos/pdf/CC_Julia_2.pdf
- Organización Mundial de la Salud. 2008. Climate change and health. Secretariat
- Ortíz M. y A.P. Méndez. 2005. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México. UNAM.
- Salazar-Vallejo S. I. 2002. Huracanes y biodiversidad costera tropical. Rev. Biol. Trop, vol. 50, no.2, p.415-428. ISSN 0034-7744.
- Secretaría de Turismo. 2008. Resultados de la actividad turística: enero-julio 2008. Fecha de consulta: 14/10/2008 en <http://www.datatur.sectur.gob.mx/pubbyrep/cua/2008/m07/cua072008.pdf>
- Strachan J. 2008. The changing climate of tourism. International Travel Insurance Journal. 26-27.
- Vilches A., D. Gil Pérez, J.C. Toscano y O. Macías. 2008. Turismo sostenible. OEI. Fecha de consulta: 14/10/2008 en <http://www.oei.es/decada/accion09.htm>.

5 Sector Salud

Tanto el IPCC como la Organización Mundial de la Salud han señalado que el cambio y la variabilidad climática son causa de muerte y enfermedades a través de los desastres de origen natural como sequías, golpes de calor e inundaciones. Adicionalmente, hay muchas enfermedades importantes que son sensibles a cambios de temperatura y precipitación. En estos se incluyen las enfermedades transmitidas por vectores (como la malaria y el dengue) o por consumo de agua (diarrea). Estos impactos no se distribuirán de manera uniforme en el mundo ni en nuestro país. Las zonas en desarrollo y zonas costeras densamente pobladas se consideran con mayor riesgo (OMS, 2008). También se han identificado impactos en salud como el crecimiento de las enfermedades respiratorias causadas por alérgenos ambientales, efectos en el desarrollo como la mortalidad perinatal o nacimientos prematuros y las afectaciones relacionadas a la sobrepoblación. Adicionalmente, es esperado un incremento en los efectos por florecimientos algales nocivos, en agua dulce y de mar, y por *Vibrio* (Longstreth, 1999).

El cambio climático tiene serias implicaciones para todos los aspectos de la vida humana, incluyendo a las enfermedades infecciosas. El efecto del cambio climático dependerá de las interacciones complejas entre la población hospedera y los agentes de infección causales. Desde el punto de vista del hombre, los cambios en el ambiente pueden disparar la migración humana, causando patrones de enfermedades. La transmisión de enfermedades puede aumentar por medio de la escasez y contaminación de las fuentes de agua potable. Es de gran importancia mencionar que el estrés político y económico puede dañar la existencia de una infraestructura de salud pública, conduciendo a una humanidad pobremente preparada para epidemias inesperadas (Khasnis y Nettleman, 2005).

5.1 Eventos extremos

La desnutrición mata anualmente a 3.7 millones de personas, la diarrea a 1.9 millones y la malaria a 0.9 millones. Tales cifras se verán incrementadas por el cambio climático tanto por el incremento de la temperatura como a través de efectos adversos en la producción de alimentos, la disponibilidad de agua y la dinámica poblacional de vectores y patógenos. Ya se tiene evidencia de la transmisión de malaria en zonas altas de África del Este (OMS, 2003).

Una de las características del impacto sobre la salud humana es que se amenaza la seguridad de la salud pública. Las altas temperaturas cambian la distribución e incrementan la probabilidad de enfermedades infecciosas transmitidas por medio de vectores, las relacionadas con el consumo de alimentos y de agua. Globalmente, la población en mayor riesgo son los niños, los ancianos y los enfermos. La población de menores ingresos, con desnutrición, poca educación, poca o nula infraestructura enfrentarán los mayores retos de adaptación a los riesgos de salud exacerbados por el cambio climático (Longstreth, 1999).

Después del impacto de eventos extremos, especialmente de inundaciones, la salud de la población se pone en riesgo por la presencia de agua residual tratada o cruda en el sistema de agua potable, un tratamiento insuficiente del agua potable, el arrastre de compuestos tóxicos al agua potable, la contaminación de suelos, acuíferos y sedimentos (Manuel, 2006). Bajo estas condiciones se hacen presentes enfermedades como diarrea, resfriados, influenza y tuberculosis (CDC, 2005; Elledge *et al.*, 2007). Esta situación se agrava por el mayor contacto entre enfermos, la falta de condiciones higiénicas y la sobrepoblación en los albergues.

Las lluvias extremas pueden transportar contaminantes fecales a las fuentes de abastecimiento y sistemas de distribución de agua potable lo que contribuye a diseminar enfermedades de origen hídrico. La presencia de granjas sin tratamiento de las excretas animales y la falta de saneamiento constituyen un riesgo de contaminación para las fuentes de abastecimiento. Enfermedades debidas a *Giardia*, *E. coli* y *Cryptosporidium* se han relacionado con eventos extremos de lluvia (Chiotti *et al.*, 2002; DEH, 2005). El cambio en temperatura también afecta la calidad del agua costera favoreciendo la sobrevivencia y proliferación de patógenos provenientes de agua residual no tratada que se descarga al océano (DEH, 2005).

5.2 Efectos relacionados con la calidad del agua

La epidemiología de las enfermedades por agua se clasifica en tres grupos: el impacto de los eventos de lluvia, el impacto de la inundación y el impacto del incremento en la temperatura (Hunter, 2003). Los segundos no se incluyen por estar insertos en el inciso de eventos extremos.

5.2.1 Eventos de precipitación severa

Existe evidencia de que después de una intensa lluvia, las concentraciones de patógenos entéricos y coliformes aumentan (Epstein, 2001; Hunter, 2003). Por ejemplo, brotes de criptosporidiasis han sido asociados con lluvias extremas que arrastran heces de granjas de animales. La turbidez del agua superficial se puede incrementar dramáticamente durante eventos de precipitación severa y esto puede causar estrés adicional en los sistemas de potabilización.

5.2.2 Efectos de temperatura

Probablemente la relación más obvia con el incremento de temperatura son los florecimientos de varias especies planctónicas que pueden afectar a la salud humana. Son varias las especies que han sido implicadas (Tabla 5.1).

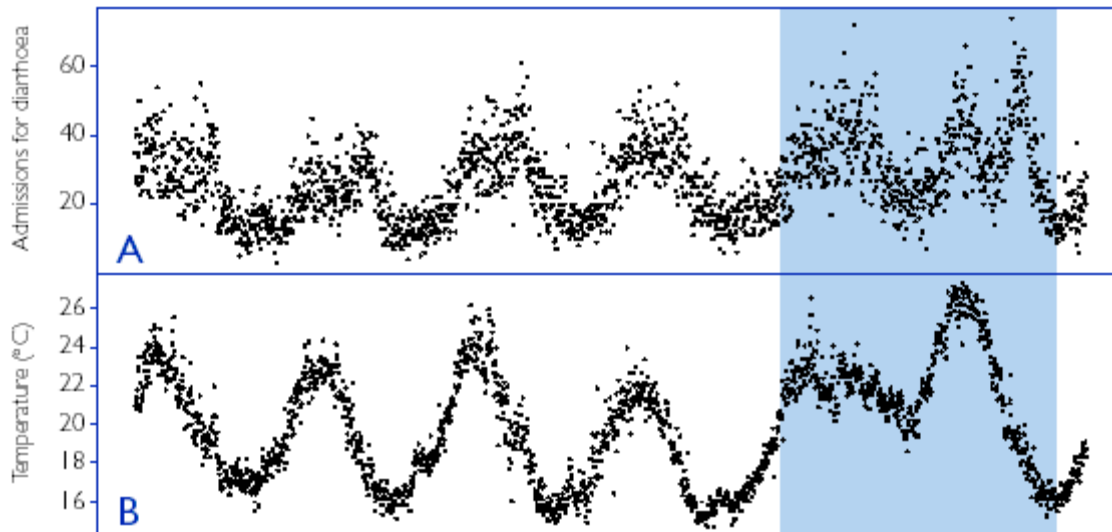
Tabla 5.1. Especies involucradas con la salud humana (Hunter, 2003)

Organismo	Efectos
Cianobacterias (verde-azules)	Ha sido relacionado en varios síndromes de casos clínicos como dermatitis, problemas respiratorios y hepatitis. Es el resultado del consumo de agua que contiene toxinas o por contacto con el agua o los florecimientos durante el baño.
Dinoflagelados y diatomeas	Están implicados en una variedad de envenenamientos neurotóxicos, diarreicos y amnésicos por mariscos.
<i>Pfiesteria piscicida</i>	Dinoflagelado que es responsable del síndrome conocido como "asociado a estuarios", que causa irritación de ojos y problemas respiratorios, deficiencias en aprendizaje y memoria y estados de confusión.

El factor principal en la aparición de los florecimientos de estos organismos es el incremento de nutrientes en los cuerpos de agua (o eutrofización). Como segundo factor desencadenante se tiene las temperaturas elevadas, por lo que la mayoría de los florecimientos suelen aparecer durante los meses de verano. La evidencia más significativa en el efecto de la temperatura sobre las enfermedades relacionadas con agua, es su relación con el cólera (Epstein, 2001; Hunter, 2003).

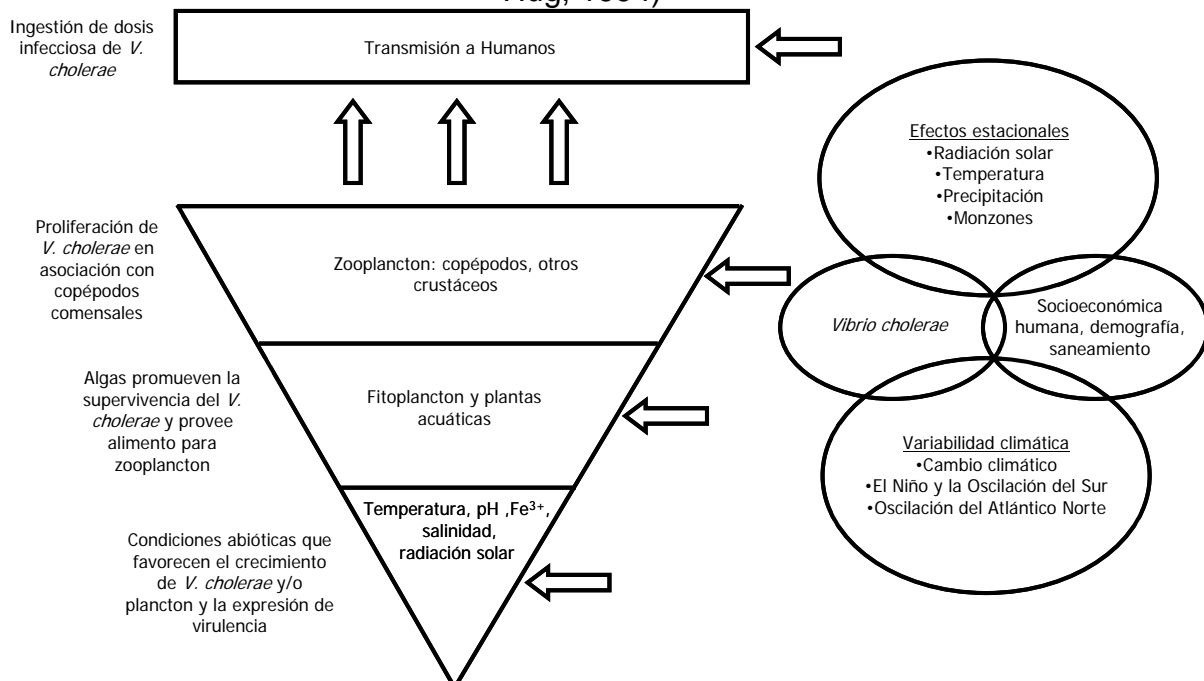
La contaminación de los suministros de agua está ligada con diarreas provocadas por el cólera, *Cryptosporidium*, *E. coli*, *Giardia*, *Shigella*, salmonela y virus (hepatitis A). La presencia de leptospirosis, *Cryptosporidium* y *Giardia* se han asociado con eventos de precipitación severos incluso en países donde el suministro de agua pública es regulado. La asociación de la turbidez del agua potable y las enfermedades gastrointestinales también ha sido señalada (McMichael *et al.*, 2003). La transmisión de enfermedades entéricas podría incrementarse por el aumento de la temperatura, vía un efecto directo en el crecimiento de los organismos de la enfermedad en el ambiente. En cuanto a los eventos de diarreas, el fenómeno de El Niño ha servido como modelo de calentamiento global en Perú, ya que altera los periodos de clima por varios años, hacia un clima más cálido. Se ha señalado que durante este fenómeno, se incrementan los casos de diarrea. Se ha demostrado que las enfermedades diarreicas se incrementan en 8% por cada grado centígrado que se incrementa la temperatura en Perú (Checkley *et al.*, 2000), tal como se muestra en la figura 5.1.

Fig. 5.1 Coincidencia en temperatura y casos de diarrea (Checkley *et al*, 2000)



El cólera, causado por *V. cholerae*, es un perfecto ejemplo de la relación del clima y las enfermedades infecciosas. La asociación entre la enfermedad y el agua se estableció en 1850. Diversos estudios han demostrado que *V. cholerae* es un organismo nativo de cualquier cuerpo de agua costero, especialmente en los trópicos y subtropicos. Además, datos de 20 años han sido considerados para explicar la relación existente entre el plancton y el *V. cholerae*. La transmisión de la enfermedad se muestra en la figura 5.2, (Colwell y Hug, 1994).

Fig. 5.2 Modelo jerárquico para la transmisión del cólera (modificado de Colwell y Hug, 1994)



La Organización Mundial de la Salud ha identificado al cambio climático como un riesgo ambiental importante para la salud. Se estimó que el cambio climático es responsable de aproximadamente el 2.4% de los casos de diarrea a nivel mundial, 6% de los casos de malaria en los países de medianos ingresos, así como 7% de los casos de dengue en los países industrializados en el año 2000. En conjunto se estimó que el cambio climático fue responsable por el 0.3% de la mortandad. En Estados Unidos se ha demostrado una correlación positiva entre los eventos de precipitación excesiva, tal que 68% de las epidemias de casos diarreicos agudos han sido asociados con el percentil de 80% de precipitación (Shea y CEH, 2007).

También es cierto que no todos los impactos de la pérdida de cobertura vegetal y cambio de uso de suelo inducido por el hombre han sido negativos pues con ello se ha eliminado algunos vectores como *S. woodi*, *Chrysops* y *Glossina* (Molyneux, 2003). Se ha establecido que en años de menor precipitación disminuye la presencia de malaria, lo que es un efecto posible también en algunas regiones de nuestro país. Se reconoce que cambios en la cantidad y calidad del agua superficial afectarán la incidencia de enfermedades diarreicas. Se ha demostrado que las enfermedades gastrointestinales agudas ocurren con mayor frecuencia durante el periodo caliente y lluvioso, cuando las condiciones ecológicas son favorables para la reproducción de bacterias, virus y protozoarios. Se especula también que el calentamiento del océano facilitará la transmisión del cólera en las zonas costeras (McMichael y Githeko., 2001; DEH, 2005).

Referencias bibliográficas:

- Center for Disease Control and Prevention. 2005. Norovirus outbreak among evacuees from hurricane Katrina-Houston, Texas. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 54 (49), 1016-1018.
- Checkley W., LK Epstein, T.H. Gilman, D. Figueroa, R.I. Cama, J. A. Patz y R. E. Black. 2000. Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *The Lancet*. 9202, 442-450.
- Chiotti Q., I. Morton, K. Ogilvie, A. Maarouf y M. Kelleher. 2002. Adapting health Infrastructures to Cope with the Health Effects of Climate Change: A Case Study in the Toronto-Niagara Region. *Climate Change Action Fund Project A077*. Environment Canada. 54 pp.
- Colwell R.R. y A. Huq. 1994. Environmental reservoir of *Vibrio cholerae*: the causative agent of cholera. *Ann N.Y. Acad. Sci.* 740:44-54.
- Department of the Environment and Heritage. 2005. *Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an efficient adaptation response in Australia*. Australian Greenhouse Office. 159 pp.
- Elledge B.L., D.T. Boatright; P. Woodson, R. E. Clinkenbeard y M.W. Brand. 2007. Learning from Katrina: environmental health observations from the SWCPHP response team in Houston. *Journal of Environmental Health*.
- Epstein P.R. 2001. Climate change and emerging infectious diseases. *Microbes and infections*. 3, 747-754.
- Hunter P.R. 2003. Climate change and waterborne and vector-borne disease. *Journal of Applied Microbiology*. 94, 37S-46S.
- Khasnis A. A. y M. D. Nettleman. 2005. Global Warming and Infectious Disease: Review Article. *Archives of Medical Research*, 36, 689-696 pp.
- Longstreth J. 1999. Public Health Consequences of Global Climate Change in the United States—Some Regions May Suffer Disproportionately. *Env. Health Perspectives*. 107, S1, 169-179.

- Manuel J. 2006. In Katrina's wake. *Environmental Health Perspectives*, 114, 1, A32-A39.
- McMichael A. y A. Githeko. 2001. Human Health. En: JJ McCarthy, OF Canziani, NA Leary, DJ Dokken y KS White. *Climate Change 2001. Impacts, adaptation and Vulnerability*. Cambridge Press. Australia. 451-485 pp.
- McMichael A., D.H. Campbell-Lendrum, C.F. Corvalán, K.L. Ebi, A.K Githeko, J.D. Scheraga y A. Woodward (Ed). 2003. *Climate Change and Human Health: Risks and Response*. World Health Organization. 333 pp.
- Molyneux D.H. 2003. Climate change and tropical disease: Common themes in changing vector-borne disease scenarios. *Transactions of the Royal Society of Tropical Medicine and Hygiene*. 97, 129-132.
- Organización Mundial de la Salud. 2003. *Cambio climático y salud humana. Riesgos y respuestas. Resumen*.
- Organización Mundial de la Salud. 2008. *Guidelines for Drinking-water Quality, incorporating 1st and 2nd addenda. Vol. 1. Recommendations*. 3rd ed. 668 pp.
- Shea K.M. y the Committee on Environmental Health. 2007. Global Climate Change and Children's Health. *Pediatrics*. 120. 5, 1359-1367.

6 Otros sectores

El agua es esencial para el adecuado suministro de alimento y un ambiente de calidad para las poblaciones humanas, plantas y animales de la Tierra. Entre los principales factores que influyen en la disponibilidad del agua se puede mencionar la lluvia, temperatura, evaporación, calidad del suelo, tipos de vegetación, así como escorrentías. Algunos de los efectos potenciales que el cambio climático tendrá sobre ciertos sectores se pueden resumir en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Ejemplos de los principales impactos directos del cambio climático por sector

FENÓMENO	PROBABILIDAD QUE SUCEDA	PARA LA AGRICULTURA, FORESTAL Y BIODIVERSIDAD
Mayor frecuencia de días y noches cálidos, menor frecuencia de días y noches fríos, días y noches más cálidos, en la mayor parte de las regiones	Virtualmente probable	Se incrementarán los rendimientos en ambientes fríos, se reducirán los rendimientos en ambientes cálidos y se incrementarán los brotes de insectos, plagas y enfermedades.
Incremento en la frecuencia de episodios de ondas de calor en la mayoría de las regiones	Es muy probable	Se reducirán los rendimientos en regiones frías, debido al estrés que genera el calor, incremento del riesgo de incendios forestales.
Incremento en la frecuencia de eventos de precipitaciones fuertes en la mayoría de las regiones	Es muy probable	Habría daños en los cultivos, erosión del suelo y pérdida de tierras cultivables. Menor infiltración de agua a través del suelo.
Incremento en las áreas afectadas por sequía	Probablemente	Habría degradación de tierras, menores rendimientos, daños y pérdida de cultivos, incremento en la muerte de ganado y en el riesgo de incendios silvestres.
Incremento en la actividad ciclónica	Probablemente	Habría daños en los cultivos, debilitamiento de las raíces de los árboles y daños en los corales.
Incremento en la incidencia de eventos extremos que incrementan el nivel del mar (excluyendo tsunamis)	Probablemente	Habría salinización de estuarios y del agua utilizada para irrigación y de los sistemas de agua dulce en zonas costeras.

Modificado de IPCC, 2007.

6.1 Agricultura

En la Tabla 6.2 se señalan algunos aspectos característicos de la agricultura y su relación con el agua.

Tabla 6.2. La agricultura y el agua

Datos de consideración acerca del agua y agricultura ante el cambio climático

- La agricultura es el mayor usuario de agua a nivel mundial.
 - Producir un kilogramo de proteína animal requiere de 100 veces más agua que producir un kilogramo de proteína vegetal.
 - Aproximadamente un 16% de la tierra agrícola es irrigada.
 - Aproximadamente un 33% de los alimentos en el mundo se producen en tierras irrigadas.
 - La irrigación especialmente con agua subterránea, requiere de grandes cantidades de energía para extraer y distribuir el agua.
 - A nivel mundial, se estima que la cantidad de agua que llega a las plantas durante el riego es menor de 40%.
-

Fuente: Pimentel *et al.*, 1997

El sector agropecuario no sólo sufre efectos por el cambio climático, sino también es fuente de gases de efecto invernadero. Por ejemplo, emite metano a través del ganado, humedales y especialmente de los arrozales así como óxido nitroso por el uso de fertilizantes. Un 80% del total de las emisiones de la agricultura, incluida la deforestación, se origina en los países en desarrollo. Algunas previsiones señalan que la mitad de la agricultura de América Latina probablemente sufrirá desertificación y/o salinización para el año 2050. Se prevé que el cambio climático reduzca el rendimiento de cultivos de riego en algunos países africanos, a partir del decenio de 2020 (FAO, 2008).

El sector agropecuario mexicano ha enfrentado transformaciones profundas durante las últimas décadas. La incidencia de los procesos de migración, urbanización de áreas agrícolas, políticas públicas poco sustentables, falta de acceso a recursos económicos y tecnológicos y competencia desigual en un mundo globalizado han configurado un difícil entorno para el sector agropecuario el cual se ha caracterizado por su escasa capacidad de adaptación a un entorno cambiante.

La superficie dedicada a las labores agrícolas en México varía entre los 20 y 25 millones de hectáreas, con una superficie cosechada de entre 18 a 22 millones de hectáreas por año. Del total de la superficie cultivada en México 22.9% corresponde a agricultura de riego y el 77.1% de temporal. El valor de la producción directa equivale al 6.5% del PIB nacional. Por otra parte, la población ocupada en este rubro oscila entre los 4 y 5 millones de personas y se estima que dependen directamente de la actividad entre 20 y 25 millones de mexicanos, en su mayoría población rural (CONAGUA, 2008).

Destaca que la superficie de riego del país ha aumentado considerablemente de 750 mil hectáreas en 1926 a 6.5 millones de hectáreas actualmente, lo que coloca al país en el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego (*op. cit.*). Asimismo el sector agrícola es el que utiliza el mayor volumen del agua a nivel nacional, para el desarrollo de sus actividades productivas, con un bajo nivel de eficiencia que oscila entre el 33 y el 55%.

De los 6.5 millones de hectáreas de riego, 3.5 millones (54%) corresponden a 85 distritos de riego (de los cuales 82 ya se han transferido a los usuarios) y 3.0 millones (46%) a 39,492 unidades de riego. Por lo que se refiere a la superficie de temporal, 2.7 de los 14.5 millones de hectáreas, corresponden a 22 distritos de temporal tecnificado (*op. cit.*).

Existen grandes diferencias estructurales entre las agriculturas de México y la de países desarrollados contra los cuales compite el agro mexicano en circunstancias sumamente desventajosas, como ejemplo se seleccionaron dos indicadores que ilustran estas diferencias. En el año 1995 la productividad agrícola por trabajador en Estados Unidos fue de US\$34,727, mientras que para México fue de US\$1,690 y el número de tractores por cada mil trabajadores agrícolas en Estados Unidos fue de 1,452 unidades y en México 20 unidades (Fujii, 2001). Esta situación repercute en la productividad, competitividad, eficiencia y finalmente en el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En algunos países en desarrollo, la agricultura podría sufrir daños por las inundaciones, la salinización de suelos, del agua superficial y de los acuíferos subterráneos costeros cuando suba el nivel del mar. Habría menor precipitación y se reduciría entonces la disponibilidad de agua para los sistemas de riego y para la producción pecuaria, especialmente en las regiones semiáridas (Banco Mundial, 2008).

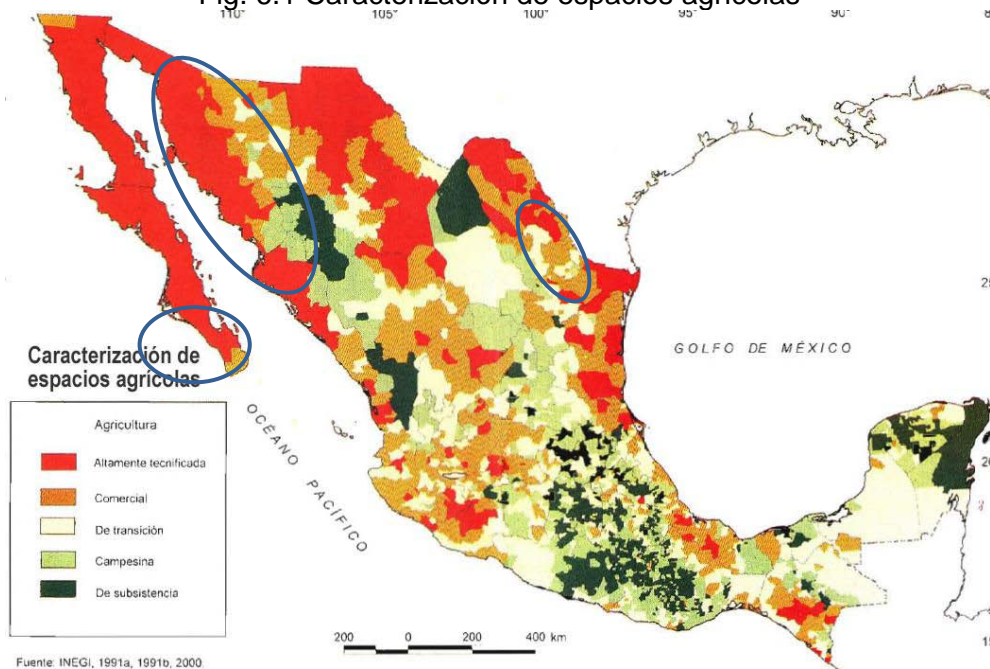
Se estima que los efectos directos derivados de las variaciones en la temperatura y precipitación principalmente serían la duración de los ciclos de cultivo, alteraciones fisiológicas por exposición a temperaturas fuera del umbral permitido, deficiencias hídricas y respuestas a nuevas concentraciones de CO₂. Algunos efectos indirectos de cambios esperados se producirían en las poblaciones de parásitos, plagas y enfermedades (migración, concentración, flujos poblacionales, incidencias, etc.) disponibilidad de los nutrientes en el suelo y planificación agrícola (fechas de siembra, laboreo, mercadeo, etc.) (Watson *et al.*, 1997).

México posee regiones con diferentes características climáticas, la mayor superficie corresponde a zonas áridas y semiáridas con el 52%, las regiones templadas cubren el 20%, el área tropical húmeda representa el 15% y el restante 13% es tropical seco; al mismo tiempo posee una orografía muy accidentada, el 64% del área corresponde a serranías y el 36% presenta pendientes menores al 10%. La precipitación media anual es de 771 mm, equivalente a 1,522 km³, lo que genera un escurrimiento anual virgen de 410 km³ y una recarga de aguas subterráneas de 48 km³, más 15 km³ inducidos por riego (Castelán, 1999), lo que demuestra que parte del agua que se estima como no aprovechada por la agricultura en realidad se reaprovecha para la recarga del acuífero.

Es probable que en algunas regiones del país el exceso de agua se convierta en un problema, ya que el cambio climático podría alterar la disponibilidad temporal del recurso. Es por ello que se deben contemplar mejoras en las tecnologías de riego y drenaje. Las regiones donde se localizan los principales productores

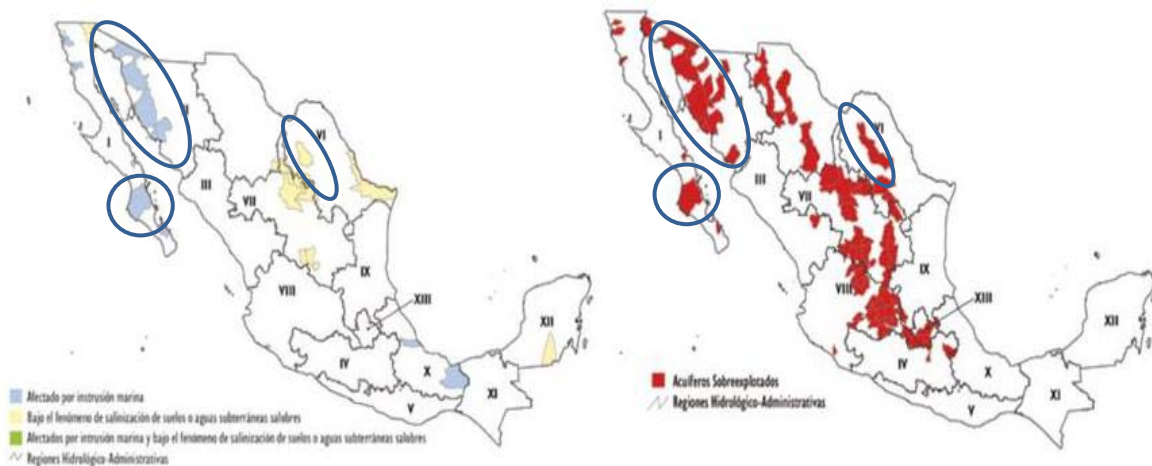
agrícolas del país son zonas semiáridas, ahí se encuentran los distritos de riego más importantes, ejerciendo una fuerte presión sobre el recurso hídrico (figuras 6.1 y 6.2). La vulnerabilidad agrícola es evidente en importantes regiones de Sonora, Baja California y Coahuila, en las cuales se desarrolla agricultura altamente tecnificada y comercial, en acuíferos sobre-explotados con intrusiones salinas o salinización de aguas subterráneas. La menor disponibilidad del agua y la disminución en su calidad en estas regiones podría generar problemas en otros sectores en el ámbito social y económico. Al mismo tiempo, acelerar procesos de desertificación y salinización.

Fig. 6.1 Caracterización de espacios agrícolas



Fuente Coll y Godínez, 2003

Fig. 6.2 Acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina



Modificado de CONAGUA, 2007

Se estima que la pérdida económica que un cambio en el medio ambiente tendría en la producción agrícola puede ir del orden de los \$16 a los \$22 mil millones de pesos anuales. Cabe destacar que estas estimaciones solamente consideran seis cultivos (maíz, café, trigo, caña de azúcar, naranja y frijol) y que no toman en cuenta la introducción de medidas de adaptación. Ibararán y Rodríguez (2007) tomaron un valor base de la producción de los seis cultivos de 39 mil millones de pesos, para el periodo 1981-2006, y estimaron una pérdida anual de la producción entre 42 y 57%. Estas estimaciones se hicieron tomando aproximaciones realizadas para esos cultivos hechas en otros países. En el caso del café y del maíz, se realizaron modelaciones para algunos municipios .

Con el aumento en la temperatura habrá mayor evaporación del agua superficial, lo que puede llevar a una mayor concentración de contaminantes ya presentes en embalses, como metales y compuestos orgánicos persistentes, lo que ha sido analizado en la sección 2.3. Las consecuencias de una mayor concentración de estos contaminantes en el agua, hacia las zonas de cultivo, son relativas pues domina la adsorción en suelo, no necesariamente la transferencia hacia los cultivos. Otro contaminante que incrementará su presencia es el nitrato, esto debido a un mayor arrastre en las zonas de cultivo y al incremento de la concentración en suelos con el aumento de la temperatura, como ya se mencionó en el inciso 2.5.

En el caso de las aguas subterráneas se prevé que se incrementará la penetración de la cuña salina en zonas costeras y consecuentemente, la salinización de las regiones hidrológicas que ya se encuentran afectadas por este proceso.

6.2 Sector forestal

Los bosques brindan una serie de beneficios ambientales para la sociedad, los cuales, debido a la acelerada deforestación y la falta de incentivos para su protección y manejo, pueden ponerse en peligro. Entre las múltiples funciones de los bosques se encuentran la protección de los suelos, constituyen un motor importante del ciclo hidrológico, fuente de fijación del carbono atmosférico, sitio de anidación y albergue de diversas especies de flora y fauna, paisaje, lugar de esparcimiento, entre otros. De acuerdo con Elorrieta y Rey (2004), estos beneficios son poco valorados, hasta que su pérdida se hace palpable en forma de daños que impliquen un costo, ya sea social, ambiental o económico.

Los bosques juegan un papel importante en el ciclo hídrico al mantener la calidad y cantidad de agua, disponibilidad de agua durante el estiaje, protección de suelos que incide en una mayor infiltración y calidad del agua, etc. Las cuencas hidrográficas cubiertas de bosques son sistemas hidrológicos excepcionalmente estables:

- Influyen en el volumen de agua aprovechable de las cuencas hidrográficas.
- Descargan agua de excelente calidad.

- Permiten reducir el volumen máximo y total del caudal de las aguas resultantes de las precipitaciones pluviales.
- Reducen la variación entre los caudales máximos y mínimos a lo largo del año.
- Garantizan la mayor estabilidad del suelo, frenan su desplazamiento y la erosión.
- Favorecen que se transporte menor cantidad de sedimentos aguas abajo.

Todas estas funciones ambientales de los bosques son importantes para mantener la calidad del agua en el rango óptimo para sus diversos usos (Landell-Mills y Porras, 2002).

Durante la última década, se ha observado en todo el mundo un extenso surgimiento de mercados y otros esquemas de compensación o pago por servicios ambientales (PSA), particularmente los relacionados con los bosques, tales como la protección de cuencas hidrológicas, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono. La puesta en práctica del PSA se basa en el hecho de que la clave para revertir la degradación ambiental es el cambio en las prácticas de la producción industrial, así como el uso del suelo en todo el mundo. Los esquemas del PSA, que contribuyen a la conservación o restauración de los bosques y el paisaje, pueden ser una fuente sostenible de ingreso adicional y aumentar el poder de decisión de los más de mil millones de pobres del mundo que dependen de los recursos naturales (Rosa *et. al.*, 2004).

Sin embargo, es importante destacar que los gobiernos no son los únicos responsables de compensar estos servicios, eventualmente será importante involucrar a los ciudadanos e industrias asentadas dentro de las cuencas hidrológicas, que se benefician directamente con los servicios ambientales proporcionados por los bosques y compensar económicamente a quienes conservan y protegen estos valiosos recursos naturales.

Este sector en particular juega un papel regulador interesante, dado que tiene importantes posibilidades de incrementar la disponibilidad del agua y al mismo tiempo mantener su calidad, si las actividades encaminadas por la CONAFOR respecto a la certificación nacional de predios forestales incrementan sustancialmente la superficie de bosques certificados. En el caso contrario si se incrementa la deforestación y la tala clandestina, entonces la disminución en la precipitación y el aumento en la temperatura, afectará de forma negativa la calidad del agua y su disponibilidad. Por otro lado, el impacto del cambio climático sobre la calidad del agua y el efecto que esas modificaciones harán sobre los recursos forestales han sido poco estudiados. En el caso de los humedales, se ha demostrado fehacientemente la aportación de estos ecosistemas a la calidad del agua pues no solo retienen contaminantes diversos, sino aportan a su biodegradación.

6.3 Biodiversidad

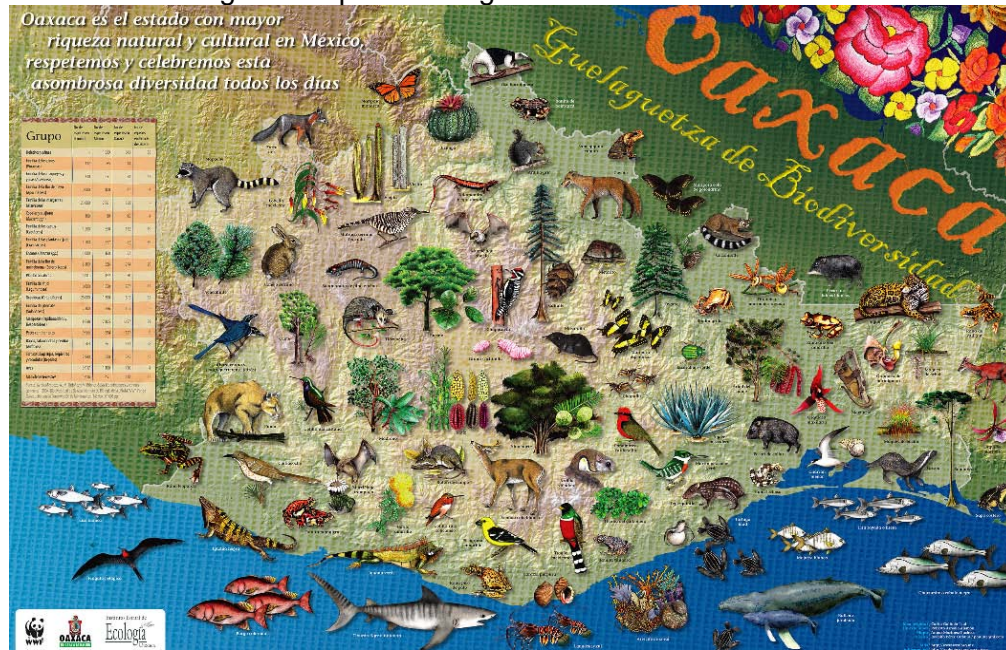
La biodiversidad es la riqueza total en composición y número de manifestaciones de las formas de vida en la naturaleza; incluye toda la gama de variación y abundancia de genes, organismos, poblaciones, especies, comunidades, ecosistemas y los procesos ecológicos de los que son parte. Según su complejidad, la biodiversidad se divide en genes, especies y ecosistemas. El número de especies sobre la tierra es muy vasto, aún cuando es desconocido en su mayoría. Se tienen catalogadas entre 1.4 y 1.8 millones de especies, en ciertas estimaciones se considera que debe haber en total unas 30 veces más ese número (Muñoz y González, 2000).

La biodiversidad es uno de los recursos naturales no renovables similar a la génesis de los combustibles fósiles, la riqueza de los suelos o los grandes acuíferos. No existe sustitución posible por algún elemento de manufactura humana. La gran virtud de la diversidad biológica radica precisamente en ser natural, resultado de un proceso de más de 4,000 millones de años de actividad biológica e interacción con el entorno constante (Swanson, 1997). Por ello, la gestión de la biodiversidad se refiere a una característica única, el legado del proceso evolutivo; en consecuencia, este aspecto de la biodiversidad la hace un recurso natural no renovable como conjunto, pese a que visto individualmente es renovable (Muñoz y González, 2000).

México se encuentra en el quinto lugar de los países más megadiversos del mundo, después de Brasil, Indonesia, Colombia y Australia. La mayor diversidad en la República Mexicana, se encuentra a lo largo del área que comienza en Chiapas, Oaxaca y se prolonga por un lado hacia el centro de Veracruz y por el otro hacia Guerrero, Sinaloa y Durango (García *et.al.*, 2004).

De acuerdo con Toledo (1988), en México se encuentra del 10 al 12% de la diversidad biológica del mundo. A nivel nacional Oaxaca es la entidad más importante en cuanto a riqueza y diversidad biológica (ver figura 6.3). La gran diversidad del país se explica principalmente por la complejidad de su topografía, la variedad de climas y la convergencia de dos zonas biogeográficas: la Neártica y la Neotropical, el número total de especies descritas es cercano a 65,000.

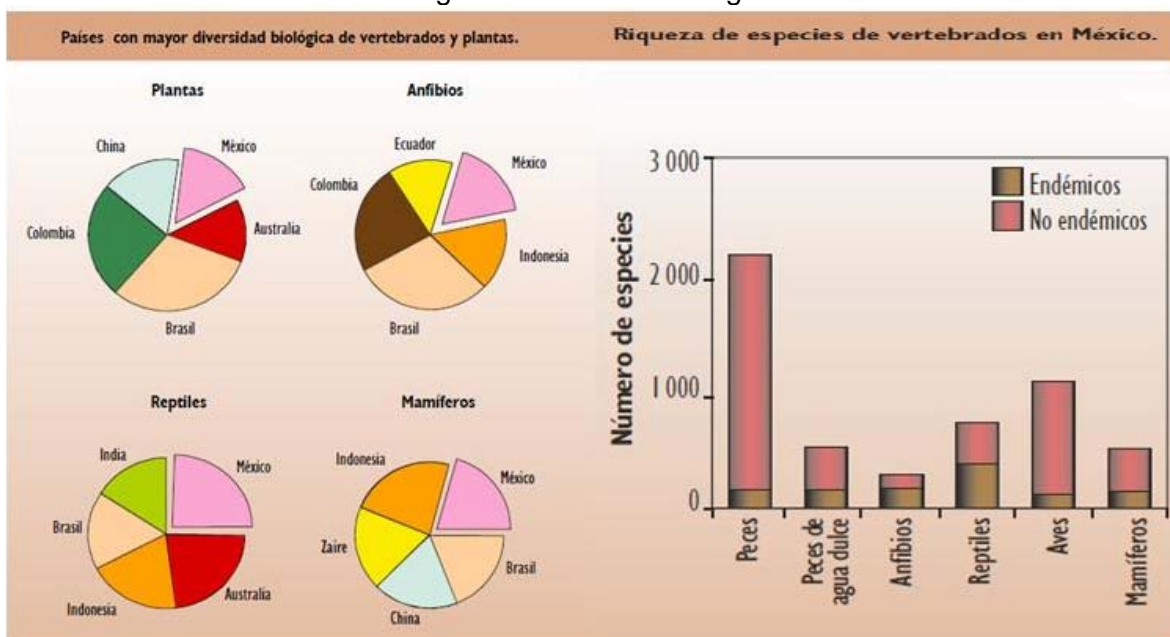
Fig. 6.3 Riqueza biológica del Estado de Oaxaca



Fuente WWF, oficina regional Oaxaca

México cuenta con el número más alto de reptiles en el mundo con 804 especies (52% endémicas), en mamíferos ocupa el quinto lugar con 491 especies (29% endémicas), el cuarto en anfibios con 290 especies (60% endémicas). La flora mexicana cuenta con 26,000 especies con un endemismo superior al 40%, entre las que destacan las familias de cactáceas con 850 especies (84% endémicas) y orquídeas con 920 especies (48% endémicas), en la figura 6.4 se observa el porcentaje de la diversidad mundial en vertebrados y plantas, junto con la riqueza de vertebrados en México y el porcentaje de endemismos (SEMARNAT, 2003). De acuerdo a la NOM-059-ECOL-2001, de todas las especies de vertebrados registradas en México cerca del 10% se encuentra en categoría de amenazados y 4% en peligro de extinción. Sin embargo, es necesario considerar que los inventarios de flora y fauna de nuestro país, enriquecen continuamente su acervo.

Fig. 6.4 Diversidad biológica



Fuente: modificado de SEMARNAT, 2003

La biodiversidad y la calidad del agua se encuentran ligados intrínsecamente en algunos ambientes que son afectados por el cambio climático global, como es el caso de lagunas costeras, manglares y arrecifes de coral. Estos ecosistemas son muy vulnerables a los efectos de la actividad humana. En el caso de los corales cuando entran en estrés puede producirse el fenómeno conocido como “blanqueamiento del coral”, que puede provocar su muerte. Este fenómeno se ha presentado en varias ocasiones durante los eventos El Niño; sin embargo, el más intenso ocurrió en los años 1997-1998, este evento podría ser representativo de lo esperado por efecto del calentamiento global de la Tierra y es una evidencia del grado de vulnerabilidad de estos frágiles ecosistemas (SEMARNAT, 2003).

Muchos ecosistemas acuáticos son altamente reactivos al cambio y la variabilidad climática y las respuestas son muy variables en una misma región y en cuerpos de agua adyacentes. Las diferencias morfométricas o hidrológicas pueden generar cambios en direcciones opuestas. Habrá cambios que se generen dentro de un mismo cuerpo de agua, mientras que otros se manifestarán sólo en comparaciones entre diferentes cuerpos de agua y por último otros serán obvios en un análisis entre regiones geográficas. Cambios en factores edáficos, climáticos, antropogénicos y morfológicos que caracterizan la tipología de lagos influyen en la limnología biológica, química y física que a su vez se verá influenciada por el cambio y variabilidad climática. De todos estos factores, tal vez la variación hidrológica es de significancia especial en términos de las fuentes de solutos y nutrientes, el caudal de agua y su distribución en precipitación- agua subterránea- escurrimientos; la influencia del tamaño de los cuerpos de agua en el tiempo de residencia y la influencia en el tamaño de la cuenca en relación al volumen del lago y las respuestas biogeoquímicas (Magnuson *et al.*, 1997).

Se ha convertido en un tema de suma importancia el de los caudales o gastos ecológicos. Para las zonas donde los escenarios predicen que se reduce la precipitación en conjunto con un incremento de la temperatura, que en México son ambos escenarios A2 y A1B, el uso del agua en varias cuencas enfrentará a los diversos usuarios. El uso ambiental ha sido por tradición el que se queda siempre con menos agua, es decir se reduce o no considera el gasto ecológico. Las modelaciones para los escenarios A2 y B2 efectuadas para varias cuencas de California señalan que en la época de estiaje el uso de agua superficial entrará en serio conflicto con el gasto ecológico necesario para diversos ríos de la entidad. Para ciertas regiones, donde la importación del agua es un hecho, podrá ser más necesaria para esa temporada y se presentará escasez de agua para los usos urbano y agrícola (Medellin *et al.*, 2006).

Las respuestas de los ecosistemas acuáticos pueden ser muy drásticas e incluir una reorganización de los mismos, con la utilización de diferentes controles y amortiguadores a los aplicados antes del cambio. Una vez pasado ese umbral y operado el cambio, es difícil revertir al estado original, toda vez que los ecosistemas muestran histéresis en sus respuestas, donde la presión que opera sobre el sistema debe reducirse mucho más abajo que ese umbral rebasado. Con frecuencia los sistemas no regresan al estado original y los límites mencionados representan puntos de no retorno, más allá de los cuales los ecosistemas presentan cambios operacionales irreversibles. El cambio climático puede inducir respuestas tipo umbral en ecosistemas acuáticos como son: a) cambios relacionados a la hipoxia de cuerpos de agua, especialmente relacionada al incremento de la temperatura del agua, b) respuesta extrema por la proliferación de especies invasivas y nocivas relacionada al incremento de temperatura y c) umbrales para la integridad del ecosistema asociado a los cambios en lluvia, evaporación y régimen de escurrimientos (Mortsch *et al.*, 2003).

La evidencia indica que incluso cambios moderados en el clima pueden dar como resultado cambios importantes en la magnitud de los eventos hidrológicos y la calidad del agua asociada. Por ejemplo, la exportación de fósforo de zonas de bosques se asocia con episodios de altos caudales y carga de sedimentos; por lo tanto el fósforo se incrementaría en agua superficial con una mayor frecuencia de eventos de tormenta. Estos eventos asociados con periodos largos de sequía entre tormentas generan escorrentías de alta concentración de nutrientes y tóxicos, que son más dañinos a los ecosistemas acuáticos que la lixiviación lenta de la misma cantidad de contaminantes. Se espera que los ecosistemas que reciben nitrógeno en exceso a su demanda biológica lixiviarán el nitrógeno excedente al agua superficial durante eventos de tormenta. Por ello, el monitoreo de los flujos de tormenta es importante para detectar los primeros signos de que los umbrales de cambio del ecosistema han sido excedidos. Los cambios en la frecuencia e intensidad de precipitación, pH, temperatura del agua, viento, bióxido de carbono disuelto y salinidad, combinados con la contaminación antropogénica por nutrientes y toxinas, pueden afectar la calidad del agua de cuerpos estuarinos y marinos (Mortsch *et al.*, 2003).

Los eventos ecológicos importantes, como el desarrollo y expansión de la hipoxia en el Golfo de México o muertes masivas de peces por envenenamiento con aluminio durante episodios de acidez sugieren que las fluctuaciones climáticas de corta duración pueden tener efectos de larga duración en el balance del ecosistema y que los monitoreos de condiciones de fondo no son los únicos requeridos para detectar cambios importantes o condiciones de estrés.

Los cambios en las zonas tropicales tenderán a ser de menor intensidad en algunos casos, pero otros serán más extremos. El impacto más marcado sobre la calidad del agua será a través de las altas temperaturas de la superficie del agua. Los florecimientos de algas o de plantas acuáticas ocurrirán de forma más frecuente en un clima más cálido y en temperaturas más altas también se incrementará la actividad microbiana y las poblaciones bacterianas y fúngicas (Ludwig, 2009). Para lagos y lagunas someras, que son frecuentes en México, se verá una exacerbación de los problemas producidos por la eutrofización, debido a los efectos sobre la cadena trófica, especialmente por el cambio hacia una predación más intensa de peces y reducción de población de zooplancton que ya ha sido observada en climas cálidos (Mortsch *et al.*, 2003).

La deforestación es una amenaza a la biodiversidad en los bosques tropicales de nuestro país, y el cambio climático reforzará la tendencia a la pérdida de especies. Las sequías de verano pueden cambiar la actividad microbiana del suelo y cambiar a su vez la disponibilidad de nutrientes con consecuencias para la flora y fauna. En suelos calcáreos, los cambios de humedad y temperatura afectan invertebrados como los grillos y los moluscos. Se incrementa el flujo de nitrógeno en el verano pero se reduce en el otoño y el invierno. Las especies raras de montaña son las que sufren mayormente la extinción, dado que no tienen reductos donde establecerse. También se prevé que el aumento de la temperaturas en invierno hará que las plagas tengan mejor sobrevivencia y con ello se incrementa el uso de plaguicidas y herbicidas (Mitchell *et al.*, 2007).

Es necesario hacer hincapié sobre la importancia de los humedales, quienes son conocidos como los “riñones del mundo” debido a su papel en los ciclos hidrológicos y procesamiento de materiales de desecho, tanto de la actividad natural como antropogénica. Otras funciones están ligadas a una biota particular – vegetal y animal- y al ecosistema, como reducción de inundaciones, incremento del flujo bajo, mejora de la calidad del agua, secuestro de carbono y provisión de hábitat a plantas y animales. Ahora se ven como un elemento esencial en el manejo y planificación de los recursos hídricos costeros. Los factores más importantes que pueden afectar a los humedales, como consecuencia del cambio climático son: los flujos de carbono, la mineralización de nitrógeno y desnitrificación, patrones de precipitación (cantidad, temporalidad y distribución espacial), flujos riparios, mecanismo de abasto de agua a los humedales, patrones biológicos de actividad y composición de flora y fauna, estratificación de cuerpos de agua profundos y disolución de oxígeno, productividad primaria de algas en lagos, así como demanda de agua alterada por parte de la población humana

(Mitchell *et al.*, 2007). Por otro lado, un cambio que ya se ha reportado en los manglares del Golfo de México, es un crecimiento hacia el norte de las zonas donde se encuentran, debido al incremento de la temperatura ambiente (Yáñez-Arancibia y Day, 2008).

En cuanto a la biodiversidad de sistemas acuáticos, el impacto en ellos es que se favorecería y estabilizaría la dominancia de comunidades fitoplanctónicas; se causarían serios incidentes de botulismo en aves acuáticas, se beneficiarían las especies invasivas, se estabilizarían los sistemas dominados por fitoplancton, contrarrestando las medidas de rehabilitación que estén en curso, se desestabilizarían los lagos con comunidades de macrófitas como dominantes, afectaría la diversidad de los niveles tróficos altos, como resultado de la producción primaria incrementada, tendrá un efecto negativo en la biodiversidad, ya que éstas se relacionan a cuerpos de agua clara, y finalmente afectaría la biodiversidad cambiando el régimen de sucesión (Mooj *et al.*, 2005).

Referencias bibliográficas:

- Banco Mundial. 2008. Adaptación y Mitigación del Cambio Climático en el Sector Agrícola. Informe sobre el desarrollo mundial 2008. Documento electrónico disponible en: http://siteresources.worldbank.org/INTWDR2008/Resources/2795087-1191440805557/4249101-1191606788175/03_Adaptacion.pdf. Fecha de Consulta: 28/08/08.
- Castelán C.E. 1999. Los Consejos de Cuenca en el Desarrollo de las Presas en México. World Commission on Dams. Prepared for Thematic Review V.3: River basins-institutional frameworks and management options 1-12pp.
- Coll H. A. y C.M. Godínez. 2003. La Agricultura en México: un atlas en Blanco y Negro. Colec. Temas Selectos de Geografía de México, (1.5.4), Instituto de Geografía UNAM, México. 152 p.
- CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales Eds. Rodríguez, T. J., Jaimes, M. O. México, 263 pp. <http://www.cna.gob.mx>. Fecha de consulta: 02/09/08
- CONAGUA. 2008. Plan Nacional Hidráulico. Comisión Nacional del Agua-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México, 158 pp.
- Elorrieta I. y C. Rey, 2004. Mecanismos de Internalización de los Beneficios Ambientales del Monte: Aplicación a la Protección contra Incendios Forestales, Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. España, 39-49 pp.
- FAO. 2008. Mitigación del cambio climático y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Documento electrónico disponible en: http://www.cinu.org.mx/especiales/2008/crisisalimentaria/documentos/mitigacion_cambio_climatico.pdf Fecha de Consulta: 28/08/08
- Fuji G. 2001. Apertura comercial y empleo agrícola en México. Momento Económico Núm. 115, mayo-junio de 2001. 45-56 pp.
- García M. A., M. de J. Ordóñez y S.M. Briones. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Instituto de Biología, UNAM. Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza, WWF. México 605 pp.
- Ibararán V. E. y S.M. Rodríguez. 2007. Estudio sobre Economía del Cambio Climático en México. Universidad Iberoamericana Puebla, Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAT. Documento electrónico disponible en: www.ine.gob.mx/cclimatico/descargas/e2007hre.pdf Fecha de consulta: 10/08/2008.

- IPCC. 2007: Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra, Suiza. 104pp.
- Landell-Mills N. y T. Porras. 2002. Silver bullet or fool's gold? International Institute for Environment and Development. Londres. 272 pp.
- Ludwig, F., P. Kabat y H. Van Schaik. 2009. Climate Change Adaptation in the Water Sector. Earthscan. 320 p. ISBN 1844076520, 9781844076529
- Magnuson J.J., K.E. Webster, R.A. Assel, C.J. Bowser, P.J. Dillon, J.G. Eaton, H.E. Evans, E.J. Fee, R.I. Hall, L. R. Mortsch, D.W. Schindler y F.H. Quinn. 1997. Potential Effects of Climate Changes on Aquatic Systems: Laurentian Great Lakes and Precambrian Shield Region. Hydr. Proc. 11, 825-871.
- Medellín J., J. Harou, M. Olivares, J. Lund, R. Howitt, S. Tanaka, M. Jenkins, K. Madani y T. Zhu. 2006. Climate Warming and Water Supply Management in California. California Energy Commission's Public Interest Energy Research (PIER) program. 49 pp.
- Mitchell R.J., M. D. Morecroft, M. Acreman, H.Q.P. Crick, M. Frost, M. Harley, I.M.D. Maclean, O. Mountford, J. Piper, H. Pointer, M.M. Rehfisch, L.C. Ross, R. J. Smithers, A. Stott, C.A. Walmsley, O. Watts y E. Wilson. 2007. England biodiversity strategy – towards adaptation to climate change. Department for Environment, Food and Rural Areas. United Kingdom. Report No. CR0327. 194 pp
- Mooj W.M., S. Hulsmann, L.N.D. Domis, B.A. Nolet, P.L.E. Bodelier, P.C.M. Boers, L.M.D. Pires, H.J. Gons, B.W. Ibelings, R. Noordhuis, R. Portielje, K. Wolfstein y E.H.R.R. Lammens. 2005. The impact of Climate change on lakes in the Netherlands: a review. Aquatic Ecology 39, 381-400.
- Mortsch L., M. Alden y J.D. Scheraga. 2003. Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Region. "Risks, Opportunities, and Responses. En: Climate Change and Water Quality in the Great Lakes Basin. International Joint Commission. <http://www.ijc.org>
- Muñoz V. C. y M. A. González (comp). 2000. Economía, sociedad y medio ambiente reflexiones y avances hacia un desarrollo sustentable en México. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP, México. 312 pp.
- NOM-059-ECOL-2001. Norma Oficial Mexicana Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Pimentel D., J. Houser, E. Preiss, O. White, H. Fang, L. Mesnick, T. Barsky, S. Tariche, J. Schreck y S. Alpert. 1997. Water resources: agriculture, the environment, and society. BioScience, 7 (2), pp. 97-106.
- Rosa H., S. Kandel y L. Dimas. 2004. .Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales. SEMARNAT-INE, 125 pp.
- SEMARNAT. 2003. Informe de la situación del medio ambiente en México 2002. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 275 pp. Visto en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/estadisticas_2000/informe_2000/index.shtml
- Swanson T., 1997. Global Action for Biodiversity. Earthscan. London
- Watson R., M. Zinyowera, R. Moss y D. Dokken. 1997. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. Summary for policymakers. Report of IPCC Working group II. 16pp.
- World Wild Foundation. 2007. Guelaguetza: biodiversidad Oaxaca. Fondo Mundial para la Naturaleza.
- Yáñez-Arancibia A. y J. Day. 2008. La tropicalización global del Golfo de México: ¿Adaptación ecosistémica al cambio climático? Panel Internacional sobre cambio climático: La zona costera y su impacto ecológico, económico y social. INECOL. Xalapa. 16 octubre.
- Toledo V.M. 1988. La diversidad biológica en México. Ciencia y desarrollo. **81**: 17-30.

7 Evaluación de impactos económicos en México ante escenarios de desarrollo socioeconómicos A2 y B2

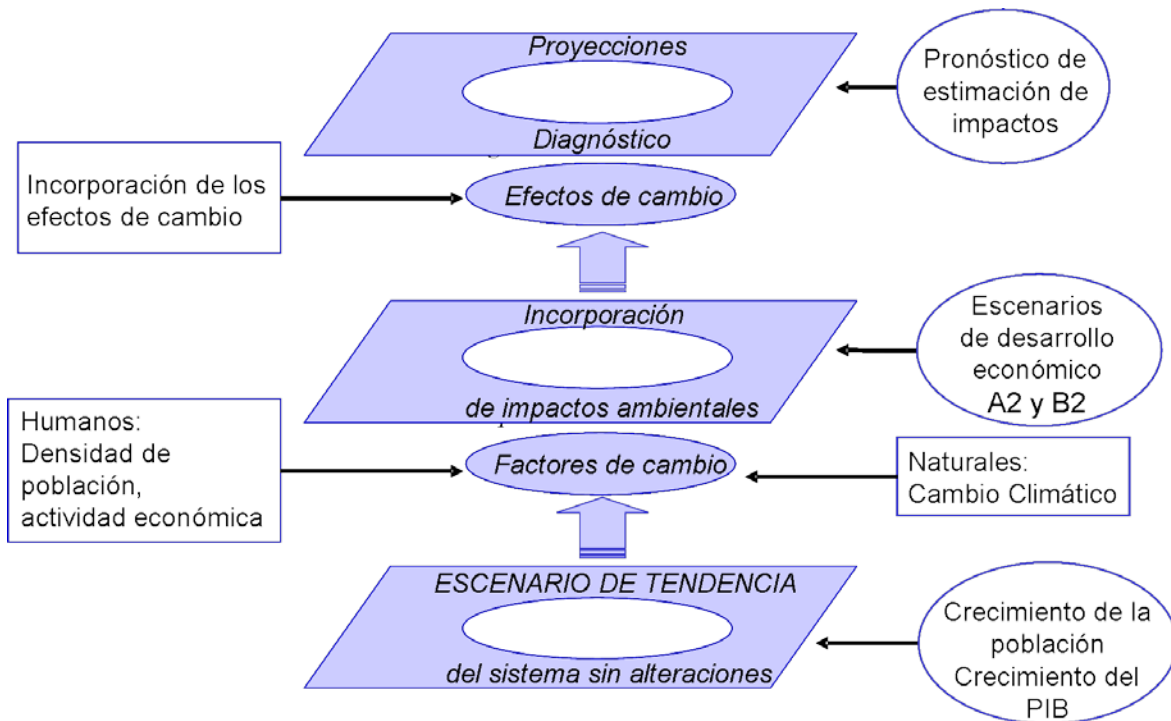
Con la finalidad de estimar los costos derivados de los diferentes escenarios socioeconómicos de crecimiento aplicados para México, a partir de los considerados por el IPCC a nivel regional y de los cuales se derivan los escenarios de cambio climático, se seleccionaron dos sectores económicos, turismo y salud, que por su relación con la calidad del agua se estima serían impactados en mayor grado, por las modificaciones ambientales inducidas por el cambio climático. Para cuantificar los impactos, se plantea un modelo prospectivo capaz de comparar entre diferentes escenarios derivado de la inacción o de tendencia, con los escenarios socioeconómicos de emisiones A2 y B2, propuestos por el IPCC, cuyas principales características se exponen en el inciso 7.2.2.

Las estimaciones de los impactos económicos en los sectores se realizan *grosso modo* y para ello se adecuan para México las suposiciones de desarrollo consideradas en los escenarios de emisiones de GEI (SRES) del IPCC, generando los escenarios bajo la consideración de desarrollo socioeconómico A2 y B2 para compararlos con el escenario de tendencia y a partir de ahí estimar la potencial pérdida esperada en el sector turismo o los costos en el sector salud.

7.1 Descripción de la técnica prospectiva utilizada para cuantificar los impactos

El análisis de los impactos económicos se hizo mediante un modelo prospectivo compuesto de tres niveles o planos (figura 7.1). El primer plano se compone de un escenario base, denominado “de tendencia”, el segundo incorpora los escenarios de desarrollo económico, sin tomar en cuenta los impactos y acciones de adaptación ante el cambio climático, y el tercer nivel cuantifica los impactos. A partir de la comparación entre el escenario de tendencia con los resultados de involucrar el cambio climático se realizan las estimaciones de los impactos económicos.

Figura 7.1. Representación esquemática del modelo prospectivo

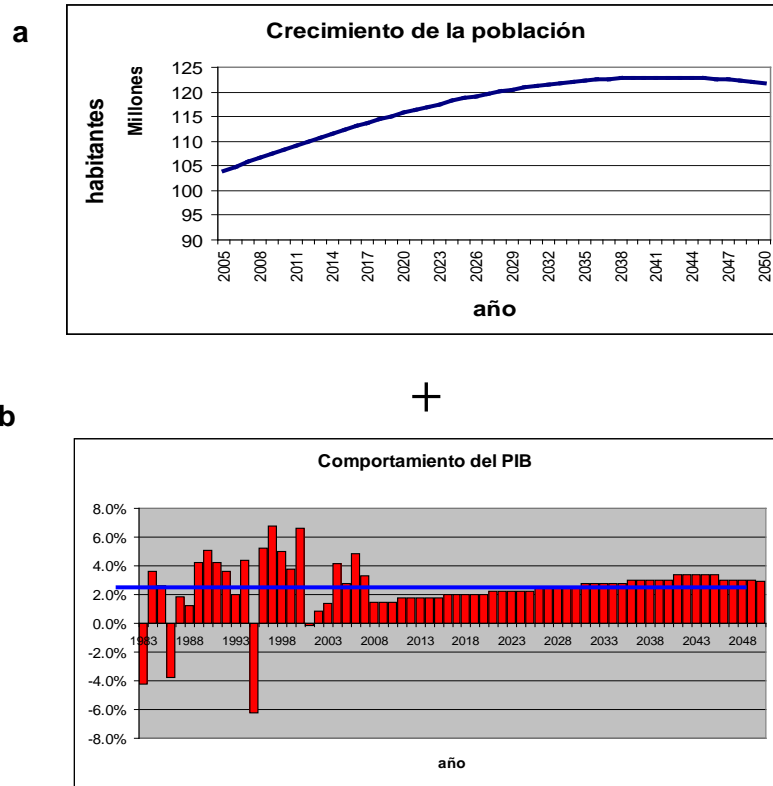


7.1.1 Desarrollo del modelo de análisis

Primer plano. Construcción del escenario que describe la situación de tendencia. Se basa en datos nacionales del futuro comportamiento del producto interno bruto (PIB), con base en la tendencia mostrada en los últimos 25 años y en el supuesto de que se mantiene el mismo modelo económico. Otro de los elementos base para diseñar este escenario es el crecimiento de la población proyectado por la CONAPO hasta 2050 (2008).

Este escenario de tendencia se plantea como un escenario de referencia, es equivalente a continuar con el ritmo actual de crecimiento económico de la nación y en el que se suponen condiciones climáticas sin cambios, semejantes a las de los últimos 25 años, y la tendencia actual en las alteraciones de las acciones socioeconómicas. El desempeño económico de los últimos 25 años, es el equivalente a un crecimiento del PIB promedio de 2.5% anual (INEGI, 2008). Para realizar la proyección hasta el año 2050, se tomó en cuenta la situación económica mundial esperada para los años próximos, por lo que se inicia con una tasa de 1.5% anual, la cual se modifica al alza en periodos de 5 años, hasta ser de 3.4% en los años 2041 a 2045. Posteriormente se le hace decrecer a semejanza de la tendencia del crecimiento de la población, como lo plantea la CONAPO (*op. cit.*), ver Fig. 7.2.

Figura 7.2. Gráficas de la construcción del escenario de tendencia 2008 a 2050. a) Proyección del crecimiento de la población de la CONAPO, b) comportamiento PIB



Segundo plano. Incorporación de los escenarios que perturbarán al escenario de tendencia. Se trata de dos escenarios de desarrollo socioeconómico, establecidos por el IPCC. Uno extremo, denominado **A2**, describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento y cambio tecnológico lento. El otro escenario es el **B2**, describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientado a las soluciones locales (IPCC, 2007).

Tercer plano. Las proyecciones o efectos, resultado de la comparación entre el escenario tendencial y los escenarios socioeconómicos A2 y B2 para México, sin considerar los impactos ni acciones de adaptación ante el cambio climático, se analizan como un costo de oportunidad. En el caso del turismo, es la oportunidad de recibir un mayor número de visitantes lo cual se mide como ingresos no percibidos. En el caso del sector salud el efecto se mide a partir de los recursos adicionales necesarios para enfrentar condiciones de desarrollo que permitan que la intensidad del cambio climático sea menor, así en un contexto de un desempeño lento de la economía, poco a poco se requerirán de mayores recursos para enfrentar un cambio climático severo, esperado bajo condiciones socioeconómicas del escenario A2, relativamente una proporción mayor respecto al PIB.

Lógica que permite establecer el nexo del presente con el futuro. Para hacer las proyecciones de tendencia de los escenarios, se utilizó información del desempeño en años recientes de los sectores por analizar, la industria turística y el sector salud. Esta información se completó con la proyección en cuanto a crecimiento económico del sector, propuesto por los especialistas, así como las metas indicadas por las Secretarías de Estado.

Descripción de la imagen final a la cual se desea llegar. Los resultados se expresan como gráficas, en las que se representarán tres curvas, una de ellas, el resultado de considerar que no habría cambio climático, y otras dos que expresarán, para cada escenario, los recursos obtenidos en el caso del turismo o gastados en el caso de salud, para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental. La inacción se mide como un costo de oportunidad: se deja de ganar o se tiene que gastar adicionalmente a lo establecido en el escenario de tendencia, figura 7.3.

7.1.2 Recopilación de la información

Para dar una explicación global y hacer la descripción sectorial, se recurrieron a las fuentes oficiales, INEGI y CONAPO y a las Secretarías de Estado: Secretaría de Turismo y Secretaría de Salud. Para mejorar la percepción del posible desarrollo de los sectores se recurrió a revisar información de instituciones internacionales como la Organización para la Cooperación del Desarrollo Económico (OCDE), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Banco Mundial (BM). Además, se revisaron documentos de especialistas publicados por diversas instituciones académicas (Hawksworth y Cookson, 2006).

7.1.3 Construcción de los elementos

Para establecer la secuencia lógica que ligue el pasado con el presente para establecer el futuro o viceversa, se procedió de la siguiente manera:

- Se identificaron y organizaron los elementos constituyentes.

La finalidad de la construcción del modelo de análisis es de estimar los costos por la inacción en sectores prioritarios, ante la posibilidad de ser afectados por el deterioro de la calidad del agua inducido por el cambio climático, lo cual obliga a plantear un modelo basado en unidades monetarias. La selección del PIB obedece a que expresa en términos monetarios todas las actividades socioeconómicas desempeñadas por el ser humano.

- Se plantearon los eventos como hechos limitados en tiempo y espacio.

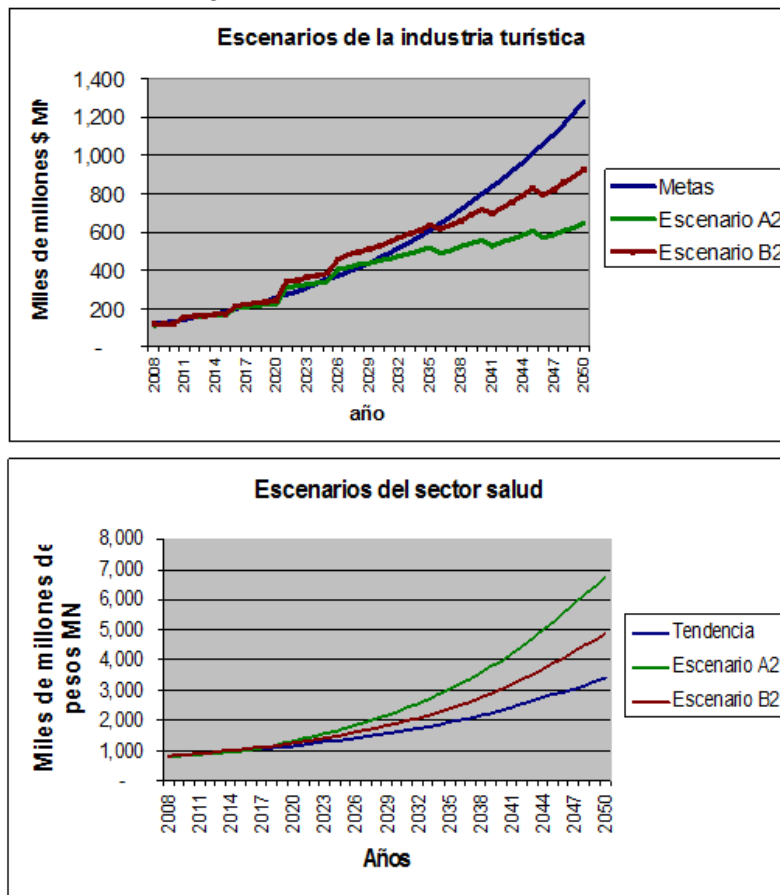
El horizonte de análisis se limita hasta el año 2050, por ser el más lejano del cual se encontraron proyecciones socioeconómicas o de tipo poblacional.

- Se plantearon las tendencias como series de uno o más hechos proyectados en el tiempo.

7.1.4 Integración sistemática de los eventos y tendencias:

- Modelos de apoyo (ver gráficas resultantes de la construcción de escenarios, figura 7.2) utilizando:
 - ✓ El crecimiento del PIB en los últimos 25 años (INEGI, 2008)
 - ✓ La tendencia de crecimiento de la población hasta 2050 (CONAPO, 2008),
- Análisis sistemático:
 - Dimensión morfológica, los resultados se pueden graficar para su mejor interpretación.

Figura 7.3. Gráficas de resultados



7.2 Definición del modelo

La herramienta para realizar el análisis de los impactos económicos se concibe como un modelo en tres planos (ver. Fig. 7.1). El primer plano define un escenario de tendencia equivalente a un escenario sin cambio en la resultante actual del clima y sin cambio en la tendencia de crecimiento de concentraciones de GEI en la atmósfera, el cual servirá como línea base para estimar los costos de la inacción, el segundo incorpora los escenarios de cambio climático futuros a través de la consideración de los escenarios de desarrollo socioeconómico A2 y B2 del IPCC,

para establecer sus impactos, y el tercer plano sirve para cuantificar los impactos económicos de la inacción.

7.2.1 Escenario de tendencia

Se plantea como la línea base para medir los efectos del clima que hasta el momento se tienen, sin considerar cambio climático. El desempeño económico se fundamenta en los resultados del crecimiento del producto interno bruto (PIB) de los últimos 25 años, equivalente a 2.5% promedio anual y crecimiento semejante a la tendencia de la población planteado por la CONAPO en 2008, figura 7.2.a. El horizonte de análisis se plantea de 2008 a 2050, por ser el alcance de las proyecciones encontradas para fundamentar este modelo.

7.2.2 Escenarios del IPCC

Se analizan dos escenarios propuestos por el IPCC (A2 y B2) para reconocer y cuantificar las consecuencias que se derivan de los potenciales escenarios de desarrollo socioeconómicos, del cual depende la magnitud del cambio climático, en el caso de México.

Escenario A2. Describe un mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento y cambio tecnológico lento (IPCC, 2007).

Para México este escenario es equivalente a mantener sus políticas económicas y tecnológicas actuales, lo cual obliga a importar y adaptar las soluciones desarrolladas en otros países como efecto reactivo a problemas no abordados. Los ahorros de no invertir en acciones preventivas (investigación y desarrollo tecnológico –IyDT-) se verán superados por los costos de pago de uso de derechos y patentes, dependencia tecnológica y subdesarrollo. En un escenario de estas características se espera un efecto multiplicador de los impactos ambientales, exacerbando aún más los efectos hacia el entorno. Se puede esperar un crecimiento de la población semejante a lo indicado por CONAPO, con un crecimiento del PIB igual al de los últimos 25 años (2.5% anual).

Escenario B2. Describe un planeta con una población intermedia y un crecimiento económico intermedio, más orientado a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental (IPCC, 2007).

Para México sería equivalente a tomar medidas preventivas locales en una dinámica de descentralización. La inversión en IyDT para desarrollar las soluciones locales provendrá del gobierno federal y de los gobiernos estatales, por lo que se mantiene una mejor expectativa que en el escenario A2. Habría un efecto multiplicador de los impactos negativos pero al mismo tiempo habría un efecto multiplicador positivo derivado de la mayor inversión que se prevé en este escenario. Como el crecimiento de población se plantea menor en 10% al establecido por CONAPO, con un crecimiento del PIB 35% mayor al de la tendencia, equivalente a 3.375% promedio anual, el país estará en una mejor

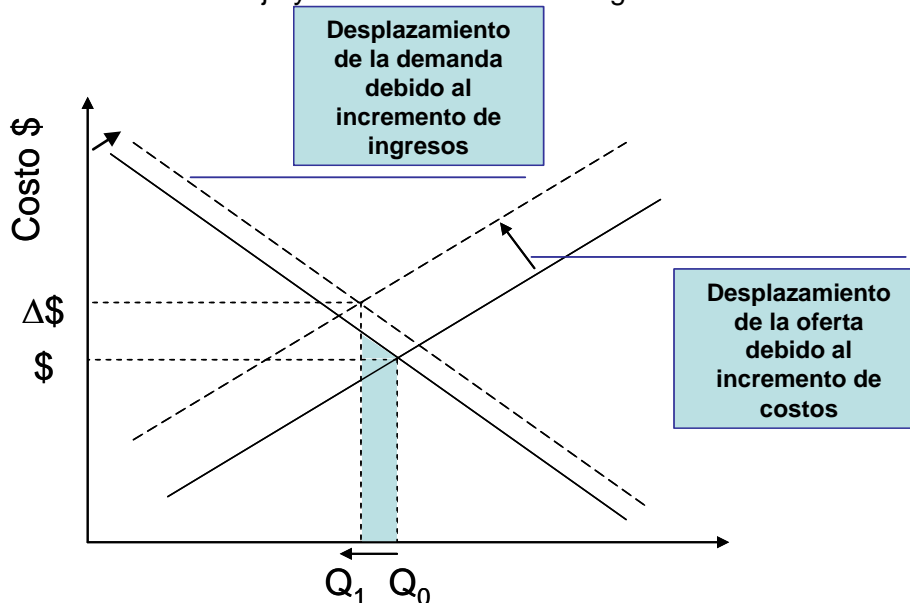
situación económica para afrontar el cambio climático, que además no se plantea de igual severidad que en el escenario A2.

7.3 Análisis de los costos económicos en la industria turística, bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico

Desde la perspectiva económica, se espera en general, que la industria turística se vea afectada por el incremento de los costos de viaje y estancias causados por las acciones que deberán emprender los centros turísticos para mitigar las emisiones de GEI y para adaptarse a los efectos nocivos derivados del cambio climático. Estas acciones provendrán tanto del sector público como del privado con miras a la preservación de un entorno sano.

Las acciones emprendidas elevarán los costos del mercado turístico lo cual impactará a la demanda negativamente, por tanto Q_0 (beneficio inicial) se desplaza hacia Q_1 (beneficio final) en la figura 7.4. Este efecto negativo se verá atenuado en parte por el aumento del poder adquisitivo de la población internacional, pero contrarrestado por el riesgo de un país con aumento en los problemas relacionados con la calidad del agua ó antiséptico, lo cual haría cambiar su destino a muchos turistas.

Figura 7.4. Desplazamiento de la oferta y la demanda debido al aumento de los costos de viaje y al incremento de los ingresos



La inacción generaría una pérdida en el beneficio equivalente al área sombreada, lo cual se traduciría en un crecimiento de menor dinamismo del sector respecto al esperado en un escenario en el que nada cambia. El gran turismo descendería, debido a la combinación de los elementos mostrados en el capítulo 2 y 4, los cuales se resumen en:

- El cambio climático pone en riesgo al ambiente, al incrementarse la temperatura afecta la biodiversidad y la calidad y disponibilidad del agua.
- Afectaciones relacionadas a la calidad microbiológica de los cuerpos de agua, importante para el turismo de playa y en la producción de alimentos del mar.

7.3.1 Construcción del escenario de tendencia para el caso de la industria turística

El ámbito analizado de esta industria es el denominado turismo de internación, el cual representa el 70% de los ingresos del sector, además de ser el más sensible al riesgo que representa un país por sus condiciones sépticas (Ramírez, 2006).

Para este caso, se utilizaron las metas propuestas en el programa Nacional de Turismo 2001-2006 (Sectur, 2001; Sectur, 2000). En este documento se plantea un crecimiento sostenido del sector de 4.1% hasta el año 2025. Con la finalidad de incorporar el comportamiento del crecimiento de la población mundial se propone hacerlo decaer a 3.5% hasta el año 2040 y finalmente 3% hasta 2050. Para el caso de los ingresos, se establece un ingreso aportado por los turistas con un monto inicial de 750 dólares en 2006 hasta terminar en \$1,930 dólares en 2050, con un crecimiento constante. Para convertir los dólares se utilizó un tipo de cambio constante de 11 pesos. Se consideran condiciones climáticas sin variación.

7.3.2 Construcción del escenario A2, para el caso de la industria turística.

Para construir la tendencia de este escenario se tomó en cuenta el desarrollo de la industria turística de internación, en los últimos cinco años, para iniciar con una tasa de aportación al PIB de 1.4%, para crecer en periodos de cinco años, hasta 3.5% de 2026 a 2035 para posteriormente decaer hasta 2.75%.

7.3.3 Construcción del escenario B2 para el caso de la industria turística.

La tendencia de este escenario se establece a partir del resultado esperado en el desempeño de la economía como se indica en el inciso de “Escenarios del IPCC”, un PIB 35% mayor al de la tendencia. Se aplican los mismos parámetros de crecimiento que para el escenario A2.

7.3.4 Resultados en la industria turística

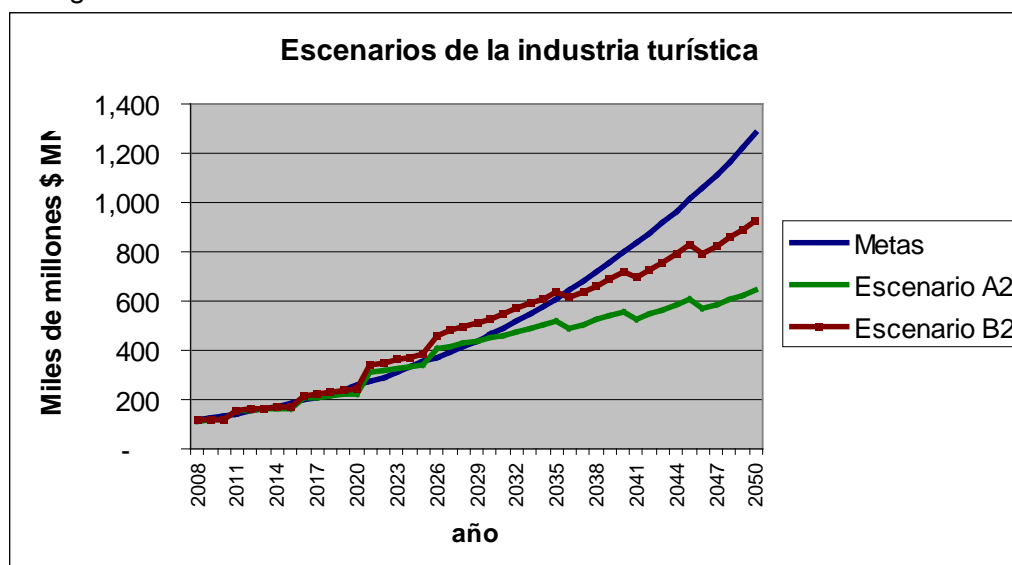
El escenario de metas se puede considerar como el ideal (figura 7.5), el cual se desarrollaría en un contexto de prevención para responder oportunamente a los impactos del cambio climático.

Los resultados del escenario socioeconómico A2, muestran una menor concurrencia de turistas debido a las condiciones de desarrollo económico esperadas. En cambio, en el escenario B2 se espera un mejor desempeño de la economía la cual arrojaría mejores resultados para el sector turístico.

Se puede estimar el ingreso por la actividad turística para cada escenario de desarrollo socioeconómico planteados por el IPCC, mostrado en verde (A2) y café (B2) en la figura 7.5. En comparación con la curva de metas, se muestra la pérdida

de recursos que se dejarían de obtener por este sector de la economía, que corresponde al área entre las curvas de metas y de escenarios, A2 y B2. El resultado es igual a 5.8 billones* de pesos para el escenario A2, mientras que para el caso B2 los impactos serían equivalentes a 1.8 billones de pesos. Estos montos son la suma de todo el período (2008-2050) y están expresados en moneda constante de 2008, es decir, sin considerar la inflación, ni cambios importantes en la paridad peso: dólar. **Es importante resaltar que a estos escenarios de desarrollo socioeconómico les faltaría incorporar los efectos directos e indirectos que el cambio climático tendría en el sector, así como las diferentes medidas de adaptación factibles de ser instrumentadas por el sector.**

Figura 7.5. Líneas de tendencia de los escenarios de la industria turística



7.4 Análisis de los costos económicos en el sector salud, bajo diferentes escenarios de desarrollo socioeconómico

Otro de los sectores que se verá fuertemente impactado por el cambio climático es el sector salud. En este caso debido a que la temperatura y el cambio del régimen de lluvias esperado impactarían la calidad del agua en sí, también se espera una mayor proliferación de vectores nocivos para la salud, como se indica en el capítulo 2 y 5. Se debe tener en cuenta que el crecimiento de los microorganismos mesófilos tiene un rango óptimo de desarrollo entre temperaturas de 20 a 40 °C y que casi todos los agentes patógenos humanos están en esta categoría (Prescott *et al.*, 2002). Además en los escenarios de cambio climático A2 y B2 se establece un clima y condiciones hídricas favorables para el desarrollo de organismos vectores portadores de enfermedades tropicales.

* millones de millones

7.4.1 Construcción del escenario de tendencia para el sector salud

Para analizar los costos esperados bajo los escenarios de desarrollo socioeconómico, que son la base de los escenarios de cambio climático, se construyó primero el escenario de tendencia. Este escenario, como ya se dijo, es la línea base para medir los impactos económicos comparados con los escenarios socioeconómicos del IPCC. El parámetro seleccionado para construir el escenario es el PIB para lo cual, como ya se indicó, se tomó en cuenta el comportamiento de tendencia de la economía de años anteriores. El gasto en salud considerado en el PIB incorpora tanto el realizado por el Sector Público como el gasto de los particulares o Sector Privado, incluye gastos médicos, hospitalarios y en medicinas (Avendaño, 2004; Lara *et al.*, 1997; Molina *et al.*, 2000; Arredondo-López y Recaman-Mejía, 2003). Este gasto no toma en cuenta las pérdidas ocasionadas debido a la incapacidad para trabajar durante los periodos de enfermedad, lo cual se traduce como costo de oportunidad cuando no se destinan los recursos suficientes para la medicina preventiva. En México la participación del gobierno en el financiamiento en salud se ha ido contrayendo en términos de proporción del PIB, en 2002, fue de 4.2% (OPS/OMS, 2005).

Para construir el escenario de tendencia para el caso del sector salud, se consideró el planteamiento del Programa Nacional de Salud 2007 – 2012, en el que se parte con un gasto en salud en 2005 de 6.5% del PIB para proyectar un crecimiento de 7% del PIB en el año 2010. A partir de 2011 se plantea la extensión del crecimiento del gasto con respecto al PIB, hasta alcanzar el 10% en el año 2050, meta semejante a la proporción destinada a la salud actualmente en los países desarrollados. Este crecimiento se plantea en dos etapas, una más acelerada del año 2010 al 2025 para llegar a 8.3% y posteriormente otro ritmo de crecimiento para llegar a la meta de 10% al 2050.

7.4.2 Construcción del escenario A2, para el caso del Sector Salud

En este caso se consideran los costos adicionales que implicaría afrontar que la magnitud del cambio climático sea mayor. Estos costos adicionales, son equivalentes a un incremento en gastos de salud a partir del año 2016, el cual se iría incrementado hasta representar el doble de lo estimado en el escenario de tendencia para el año 2050, 20% del PIB. Un gasto en salud de esta magnitud puede parecer un poco exagerado, pero se deben considerar aspectos como: un ambiente exacerbado por el clima que obligará a destinar mayores recursos a la salud., Los Estados Unidos de América destinaron poco menos del 15% de su PIB a la salud en el 2002 (Science Actualités, 2004).

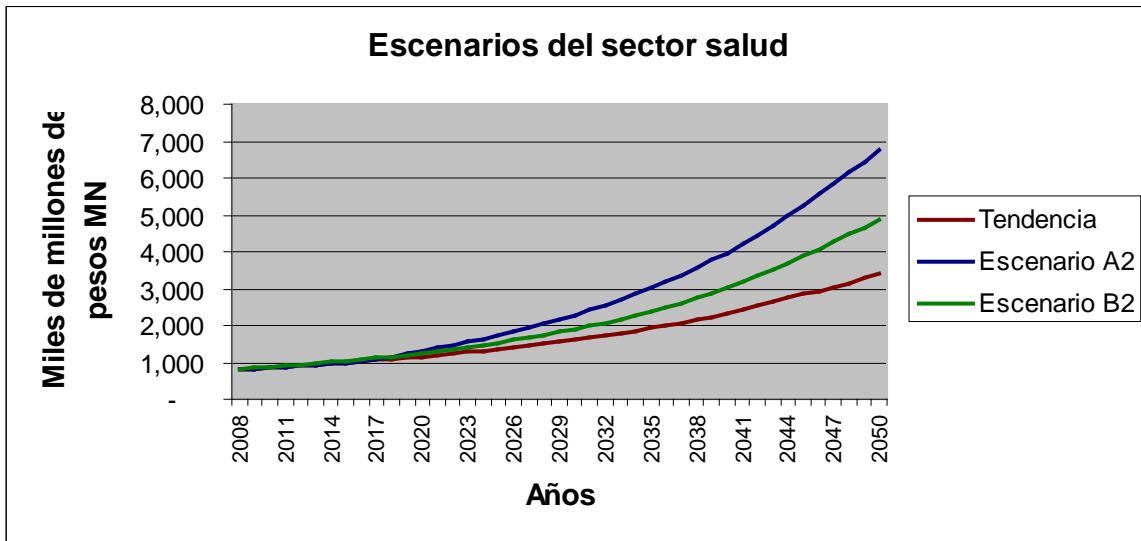
7.4.3 Construcción del escenario B2, para el caso del Sector Salud

La construcción de la tendencia del escenario de desarrollo socioeconómico B2, supone que habrá cierta actitud local para abordar el problema de salud, por lo que el gasto en salud con respecto al PIB se conserva de manera semejante al previsto para el escenario de tendencia. La diferencia se encuentra en el mejor desempeño de la economía previsto para este escenario, por lo que en números absolutos se destinarían mayores recursos a la prevención de enfermedades así como a su tratamiento.

7.4.4 Resultados del Sector Salud

Los resultados de la modelación en el sector salud, se grafican en la figura 7.6. En este caso la curva de tendencia considera condiciones ideales, sin cambio climático. Los escenarios socioeconómicos A2 y B2 indican el gasto adicional que se debería desembolsar para afrontar las enfermedades, como consecuencia del deterioro de la calidad del agua debido al cambio climático futuro.

Figura 7.6. Líneas de tendencia de los escenarios del sector salud



En el escenario socioeconómico A2, que se traduce en un deterioro mayor del clima, seguramente se tendrá que desembolsar mayores cantidades de recursos para paliar los daños a la salud. En un escenario menos pesimista, como el B2, los recursos necesarios serán menores. El modelo arrojó para el escenario de desarrollo socioeconómico A2 un requerimiento adicional al escenario de tendencia, por 45.5 billones de pesos para el periodo analizado, para 2050 se requerirá utilizar el equivalente al 20% del PIB para gastos en salud. El mejor desempeño de la economía del escenario B2 requerirá destinar más recursos que la meta considerada de 10%. **Es importante resaltar que a estos escenarios de desarrollo socioeconómico les faltaría incorporar los efectos directos e indirectos que el cambio climático tendría en el sector, así como las diferentes medidas de adaptación factibles de ser instrumentadas por el sector.**

7.5 Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos son congruentes con los escenarios planteados. Para el caso del turismo, las condiciones de salubridad que podrían haber, específicamente derivadas por el deterioro de la calidad del agua combinado con otras enfermedades exacerbadas por el calor y la humedad, provocarían una disminución en el número de turistas, sobre todo en un escenario como el

planteado en el caso A2 donde las acciones para mitigar o paliar los impactos negativos de un cambio de clima futuro serían insuficientes. En el caso del escenario B2, se esperaría una mejor respuesta para abordar los problemas derivados de un cambio no tan extremo como el planteado en el escenario A2, por lo que el impacto estaría más relacionado con el aumento de los costos, derivados de las acciones emprendidas para remediar los impactos ambientales, sobre todo más recursos para tratar el agua para consumo, recreación y residual.

Para el caso de la salud, en el escenario A2, se presenta una condición extrema en la que seguramente la población se verá obligada a destinar mayores recursos a la salud. Se debe tener en cuenta que el crecimiento del PIB tiene una dinámica menor en este escenario y por lo mismo la cantidad de recursos destinados a la salud serían mayores proporcionalmente, basado en el incremento de la demanda debido al agravamiento de las condiciones del entorno. El escenario B2, con una mejor dinámica de crecimiento del PIB y de respuesta ante los daños que pudiese haber por el cambio climático, requeriría de menores recursos para paliar los problemas de salud.

La falta de información impide separar la contribución a las enfermedades, atribuible a la calidad del agua, por ejemplo, por tratarse de un sistema en el que los impactos tienen causas multifactoriales, entre ellos el cambio climático.

Referencias bibliográficas:

- Arredondo-López A. y A.L. Recaman-Mejía. 2003. El Financiamiento de la Salud en México: Algunas Evidencias para las Políticas del Sector. Rev. HITOS DE CIENCIAS ECONÓMICO ADMINISTRATIVAS, enero-abril 2003. Año 9, Número 23. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. pp. 9 a 16.
- Avendaño N. 2004. Proyección del Gasto en Salud por Fuente de Financiamiento y los Flujos Estimados de Financiamiento del Sector Salud 2005-2015, Ministerio de Salud, Nicaragua, 16pp.
- CONAPO. 2008. Proyecciones de la Población de México 2005-2050. Documento electrónico disponible en: < <http://www.conapo.gob.mx/00cifras/5.htm>>
- Hawksworth J. y G. Cookson. 2006. The world in 2050, Beyond the BRICs: A broader look at emerging market growth prospects, Price Waterhouse Coopers, New York, USA, 34 pp.
- INEGI. 2008. Banco de Información Económica, Estadísticas de contabilidad nacional: Producto interno bruto trimestral, a precios de 1993, valores absolutos, desde 1980 hasta 2007. Documento electrónico disponible en: < <http://dgcnesyp.inegi.org.mx/cgi-win/bdieintsi.exe/NIVA100120007000020050#ARBOL>>
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (editores). Ginebra, Suiza, 104pp.
- Lara A., O. Gómez-Dantés, O. Urdapilleta y M.L. Bravo. 1997. Gasto Federal en Salud en Población No Asegurada: México 1980-1995. Rev. Salud Pública en México, marzo-abril, 1997/vol. 39, número 002, Instituto Nacional de Salud Pública, México, pp. 102-109. Salud pública Méx [online]. 1997, v. 39, n. 2.
- Molina R., M. Pinto, P. Henderson y C. Vieira. 2000. Gasto y financiamiento en salud: situación y tendencias. Rev Panam Salud Publica [online]. 2000, v. 8, n. 1-2 [cited 2008-11-07], pp. 71-83.

- OMS/OPS. 2005. ESTRATEGIA DE COOPERACIÓN CON EL PAÍS MÉXICO, Organización Panamericana de la Salud, Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, Washington, USA. 120 pp.
- Prescott L. M., J.P. Harley y D.A. Klein. 2002. Microbiología, Mc Graw Hill, Madrid, España, 1240 pp.
- Ramírez-Hernández J. J. 2006. Actividad económica del sector turístico mexicano: Situación actual, tendencias y cointegración, Aportes, Revista de la Facultad de Economía, BUAP, Año XI, Números 31-32, Enero - Abril y Mayo - Agosto de 2006, México.
- Science Actualités. 2004. Quelle est le coût de la santé. SCIENCE ACTUALITÉS [online]. Documento electrónico disponible en: <http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/science_actualites/sitesactu/dossier.php?langue=fr&id_dossier=141&id_article=4570&tc=QACTU>
- Secretaría de Salud. 2007, Programa Nacional de Salud 2007-2012. Por un México sano: construyendo alianzas para una mejor salud. Primera edición, 188pp.
- Secretaria de Turismo. 2000. Estudio de Gran Visión del Turismo en México: Perspectiva 2020, Reporte Analítico, Centro de Estudios Superiores en Turismo. México, 174 pp.
- Secretaría de Turismo. 2001. Programa Nacional de Turismo 2001-2006, Capítulo 4, Dimensionando el horizonte 2006 y 2025, pp. 075-078, México.

8 Medidas de adaptación

Se han desarrollado guías generales para establecer los elementos esenciales de una estrategia de adaptación (Tompkins *et al.*, 2005) que incluyen acciones como:

- a) Responsabilidad para el desarrollo
- b) Planes de manejo de riesgo
- c) Relación a otros procesos de planeación
- d) Legislación e implementación.- Las políticas públicas deberán ser alineadas en su conjunto con el tema de cambio climático.
- e) Redes de soporte.- La información puede generarse regionalmente con costos menores para los países de la región en cuestión.
- f) Adaptación financiera.- Algunas estrategias deben ser adoptadas, las cuales son benéficas con o sin cambio climático: mejor planeación de uso del suelo, protección de los amortiguadores costeros como manglares y pastos marinos, prohibición de construcción en tierras inundables o bajas, mejora de la vivienda, mejora de los estándares de construcción, manejo de desastres y otros.
- g) Información y ciencia de alta calidad.- La fuente de información debe ser los sitios oficiales y trabajar para que se compile información de la región. La ciencia de alta calidad incluye la colección de datos localmente, el monitoreo de fenómenos y generar información para los modelos locales. La información recopilada puede ser temperatura del aire, temperatura de la superficie del mar, precipitación, nivel del mar, indicadores biológicos como fechas de floración, anidación, velocidad de blanqueo de corales.
- h) Educación y comunicación.- Las universidades juegan un papel muy importante en este tema y deberán convertirse en extensionistas del conocimiento junto con la gente de las localidades (Jacob, 2008). Los medios de comunicación deben ser portavoces de las nuevas propuestas para que la población esté informada y pueda tener una opinión decisiva en la mitigación y adaptación ante el cambio climático.

Estos elementos llevan a una secuencia de siete pasos que, lejos de ser lineal es más bien un ciclo iterativo que incluye evaluación del resultado y retroalimentación con involucramiento del sector en cuestión como primer paso, la definición del problema como segundo, la determinación de la capacidad adaptativa del sector es la tercera etapa, seguida de la identificación de opciones de adaptación, la evaluación de opciones de adaptación y selección del curso de acción, la implementación de adaptación y el monitoreo y evaluación de la adaptación. Una vez que se ha llegado a la etapa implementación de adaptación, se debe regresar a la etapa de identificación de opciones y ver si se está cubriendo todo el esquema originalmente planteado. Igualmente, cuando se efectúa la evaluación debe volverse a la identificación de opciones de adaptación y revisar si falta algún punto adicional o es un faltante en la implementación.

También se han identificado barreras a la implementación, mismas que es necesario corregir en los sectores involucrados. Entre ellas puede contarse la incertidumbre acerca de la naturaleza misma del cambio climático y sus impactos, la complejidad y cambios en los impactos del cambio y en el mensaje de adaptación, la inmediatez del horizonte de planeación de muchos interesados, comparados con el cambio climático, restricciones de recursos y la percepción de costos adicionales alrededor de la adaptación y la mitigación, la diferencia en el trato entre la incertidumbre del clima y la incertidumbre del sector económico, falta de madurez de ciertos mercados de bienes y servicios para aceptar la adaptación, dependencia de muchos sectores interesados hacia la regulación, estándares y códigos que no han sido puestos al día involucrando el cambio climático, la percepción de que hay ausencia de precedentes o ejemplos de adaptación en ciertos sectores, la especificidad de la adaptación e imposibilidad de dar salidas fáciles, la percepción de que el sector inversionista no ha sido probado en algunos sectores, la falta de manejo de alto nivel y apoyo político para la respuesta adaptativa, falta de aceptación en los expertos nacionales, inercia organizacional y profesional que lleva a la inflexibilidad y resistencia al cambio, falta de percepción del cambio climático como un problema real por parte del público y de los individuos, dificultades asociadas al cambio del comportamiento individual, falta de políticas conjuntas entre los diversos niveles de decisión (CEP y LUC, 2006).

Hay ciertos cambios de conducta que son imprescindibles, ya que se ha identificado que el 80% del impacto ambiental de nuestro consumo está alrededor de cuatro decisiones; qué comemos, cómo llevamos nuestra casa, qué vacaciones tomamos y cómo nos movemos. Si no se modifican nuestras costumbres en uno de estos temas, no hay un cambio en el impacto que el ser humano está causando al ambiente (ChangeLab, 2007)

8.1 Adaptación en calidad del agua

En el tema de agua para abastecimiento público, el sector y los organismos operadores deberán hacer frente al cambio climático con mayor vigilancia de la calidad del agua de sus sistemas. En aquellos casos en que se hace uso de agua superficial, como en el Valle de México y Guadalajara, habrá que redoblar la vigilancia para detectar y resolver problemas por eutrofización, arrastre de contaminantes químicos y biológicos, Compuestos Orgánicos Persistentes, metales y cianotoxinas (por florecimientos de cianobacterias); atención especial en aguas con influencia de zonas agrícolas (contaminación difusa) y la presencia de metales y nitratos; reducir la eutrofización y mejorar el saneamiento de las corrientes de agua que son fuentes de abastecimiento.

Como medida de adaptación es imprescindible que se avance en saneamiento en los próximos 10 años, de tal manera que se reduzca el rezago presente y se logre el fortalecimiento de los sistemas ambientales acuáticos. Desde ahora podrían tomarse medidas de tratamiento en embalses con presencia de metales en sedimentos tal que se inhiba la redisolución de metales a la columna de agua,

especialmente si son cuerpos de agua donde ya se detecta deficiencia de oxígeno disuelto por temporadas prolongadas. Esto evitaría también la generación de olores y sabores desagradables en el agua. Pueden establecerse medidas generales preventivas de rehabilitación en cuerpos de agua contaminados, para reducir el riesgo de exposición de la población y los organismos a sustancias potencialmente peligrosas. Esta estrategia sería similar a la adoptada en los países nórdicos para enfrentar y corregir la acidificación de cuerpos de agua, llevada a cabo en los años 80's. En Australia se ha desarrollado el Programa de Protección a Ríos, con una vertiente importante de mejora de la calidad del agua y condiciones ambientales en sistemas riparios y humedales (DEH, 2005).

En ciudades donde la fuente de abastecimiento es primordialmente agua subterránea, deberá darse seguimiento a la presencia de nitratos, arsénico, flúor, fenoles, benceno y otros compuestos aromáticos, tricloroetileno y otros compuestos clorados, Compuestos Orgánicos Persistentes, coliformes fecales que son moderadamente móviles, persistentes y solubles en agua. En ambos casos, estas sustancias son detectadas, su remoción implica mayor gasto para las plantas potabilizadoras. El sector requiere fortalecimiento financiero para los próximos 20 años, de tal manera que pueda enfrentar los requerimientos de tratamiento de potabilización de manera sana en sus finanzas.

Gran Bretaña ha establecido una serie de estrategias para el manejo de los recursos hídricos, a nivel de la cuenca, nivel regional y a nivel urbano, con especial énfasis en incrementar la calidad de los recursos hídricos. En el primer caso, se tienen acciones para el control de los aprovechamientos de los acuíferos, manejo de las fuentes puntuales de contaminación, mayor aplicación de sistemas separados de drenaje para agua residual y agua de lluvia, reinyección de agua para recarga del acuífero mediante sistemas de drenaje sustentable, reúso creativo de agua residual tratada, manejo de embalses en las partes altas y bajas de una cuenca (Shaw *et al.*, 2007). Tanto en Singapur como en Albuquerque se han implementado diversas iniciativas a raíz de que ya tienen escasez de agua, sin tomar en cuenta el factor de cambio climático. En el primer caso con reúso de agua tratada de excelente calidad para uso industrial y comercial y un manejo del agua como un todo, tanto demanda como disponibilidad, manejo de agua de lluvia y agua residual, con énfasis en la efectividad institucional. En Albuquerque se ha dado prioridad al paisajismo xerófilo, incorporando plantas seleccionadas por su eficiencia en la necesidad de agua. Las autoridades provén a los residentes guías, diseños y listas de plantas aceptadas por su eficiencia.

A nivel regional se han integrado acciones como la colecta de agua de lluvia y esquemas de almacenamiento que contribuyen a reducir los riesgos de inundaciones urbanas y simultáneamente proveen de una fuente adicional de agua, incrementar la humedad del suelo o sustentar el enfriamiento por evaporación; uso de agua de lluvia para riego y sanitarios, un manejo de drenaje separado de agua superficial y agua residual, introducción del paisajismo xerófilo, uso de sistemas de drenaje sustentable, reciclado y reúso de agua sustentable, estándares de eficiencia de uso de agua más estrictos, así como el manejo

efectivo de los caudales excedentes de lluvia tal que no contaminen el agua superficial. Estas acciones han sido probadas ya en Wessex, donde el 95% del agua de sanitarios proviene de agua gris o de lluvia (Shaw *et al.*, *op.cit.*).

A nivel urbano se han integrado técnicas ya disponibles para el reciclado de agua gris, la colecta y almacenamiento de agua de lluvia, utilización de acuíferos someros de baja calidad para la irrigación de áreas verdes urbanas, introducción de válvulas y conexiones eficientes, así como el uso de sistemas de drenaje sustentable y pavimento permeable que permiten que el agua de lluvia se infiltre a través de una geomembrana que atrapa algunos contaminantes pero que deja pasar el agua al acuífero (Shaw *et al.*, *op.cit.*). Este sistema ya está en uso en nuevas urbanizaciones en Gran Bretaña que abastecen su propia agua de sanitarios con agua de lluvia colectada hasta en un 50%. En México entidades como Nuevo León y Aguascalientes han avanzado en saneamiento, lo que ha permitido disminuir el déficit que tienen en este tema.

Se hace hincapié en que es necesario dar seguimiento a las modificaciones que la calidad del agua puede haber sufrido por el cambio climático, ya en curso. Sin embargo, en este momento no es posible desarrollar una metodología debido a la falta de datos públicos consistentes de calidad del agua. Como primer paso es necesario que con datos públicos confiables se analice si es posible detectar cambios en temperatura, oxígeno disuelto, DBO, DQO, nitratos y otros factores. En este sentido, ya hay algunas investigaciones en curso en México, auspiciadas por el Gobierno Británico. Posteriormente, se podrá desarrollar una herramienta que permita medir el cambio en calidad del agua, prever cambios en los ecosistemas y de ser posible prevenir cambios mayores.

8.2 Adaptación en el sector agua

Se calcula que la disponibilidad de agua en México se puede ver reducida en 10% con respecto a la media anual actual (Martínez, 2005). Los escenarios analizados en el capítulo 3 muestran que hacia finales del siglo es probable una reducción de hasta 31% en la precipitación, con la mayor reducción en el norte del país y la menor en la frontera sur. Este escenario prevé una reducción en la disponibilidad no sólo en las regiones del norte sino además en las regiones que importan agua de otras cuencas como es el Valle de México. Las regiones administrativas donde hay actualmente sobreexplotación, contaminación y presión fuerte sobre el recurso hídrico deben tomar medidas urgentes para iniciar cuanto antes su adaptación al cambio climático. En cuanto al uso público urbano del agua, en el Distrito Federal se ha desarrollado el Plan de Acción Climática que establece medidas, acciones y presupuestos para ahorro de agua en viviendas, mejora de infraestructura de bombeo, reducción de fugas, rehabilitación de tuberías y sectorización del sistema de distribución, captura de agua de lluvia, ampliación de la capacidad de tratamiento de agua residual, recarga de acuíferos con agua pluvial, mejora en el sistema de cobro de agua, así como ampliación de la red para reúso del agua (GDF, 2008). En cada región administrativa debe hacerse un análisis de la fuente

de agua más importante, tomar acciones para su protección, incluyendo el saneamiento y reúso de agua, así como adaptarse a la reducción en la disponibilidad. Entidades como Nuevo León, Aguascalientes, Sonora y Querétaro han avanzado en este tema con mejora del saneamiento urbano e incluso rural, reinyección de acuíferos, educación ambiental, reducción de fugas, sectorización de las redes de agua potable y otros.

En aquellas regiones donde la agricultura es la responsable del mayor uso del agua, es impostergable que se tomen acciones que incrementen la eficiencia del sector agrícola, para que con una menor disponibilidad se tenga una producción agrícola similar a la actual, deberá hacerse el análisis de si un cambio en cultivos es necesario, especialmente a especies que utilicen menos agua y sean resistentes a suelos salinos, agua de sólidos disueltos mayores a 2000 mg/L, así como a una temperatura ambiente mayor. Adicional a lo anterior, deben tomarse medidas para proteger a la población de una pobre calidad de agua. En este sentido, dado que el 70% del agua para uso público urbano proviene de aguas subterráneas, la problemática debe ser enfocada sobre la vigilancia de nitratos, arsénico, hierro y manganeso, hidrocarburos aromáticos e hidrocarburos derivados del petróleo y coliformes fecales como indicadores de calidad bacteriológica, entre otros. Ya se ha mencionado en el capítulo 2 los estudios que son necesarios en el país y la importancia que éstos revisten para el análisis de los impactos posibles en México.

8.3 Adaptación en el sector turismo

La adaptación en el sector turismo debe iniciar con la toma de conciencia del sector ante el problema y suficiente información. De ello dependerá a su vez, la habilidad para cambiar patrones actuales en el sector. Uno de ellos es la posible modificación al calendario de las temporadas altas y bajas con una tendencia a favorecer el invierno e inicios de primavera donde la temperatura es menor, al igual que la precipitación pluvial. Este fenómeno ya se ha observado para cierto sector de turismo y ciertas regiones, como el sector de jubilados que visitan el Pacífico Mexicano. La estrategia de adaptación al turismo requiere que se reconozca la necesidad de adaptación en un contexto paralelo a otras estrategias y políticas para el desarrollo sustentable del país. La variabilidad climática no es nueva y el sector turismo ya tiene experiencia en este tema, habrá que utilizar esa experiencia para adaptar el sector al cambio climático. Por otro lado, la adaptación toma lugar a diferentes niveles, en particular a nivel local y requiere el involucramiento del sector turístico local. No habrá estrategia de adaptación que sea inmóvil y será un proceso iterativo largo que durará tanto como el siglo (Simpson *et al.*, 2008).

Se han identificado puntos clave en el sector como los siguientes:

- a) Deben crearse las condiciones que permitan la adaptación, tal vez exista falta de conocimiento, instituciones débiles, recursos naturales degradados, infraestructura inadecuada, recursos financieros insuficientes y falta de

políticas públicas adecuadas. Esto lleva a que es importante el fortalecimiento de las instituciones y mejorar la toma de decisiones.

- b) El desarrollo del sector debe estar integrado con el desarrollo en general y en particular afianzar el concepto de sustentabilidad ambiental, esto incluye las políticas públicas federales, estatales y municipales, robustecimiento de las finanzas, el manejo del agua y de la tierra y la salud pública.
- c) La protección de los recursos naturales se vuelve vital pues recursos naturales degradados son más vulnerables al cambio climático. La rehabilitación y protección de playas, humedales, pesquerías, biodiversidad y bosques es crítica para una mejor adaptación.
- d) Es necesario que haya recursos financieros para enfrentar los cambios y desarrollar las estrategias de adaptación, de otra manera puede constituirse en barreras a la adaptación y a las soluciones innovadoras.
- e) Se requiere que las instituciones universitarias se conviertan en agentes de cambio o extensionistas del conocimiento que generan (Jacob, 2008).
- f) Es importante determinar la capacidad de carga de turismo en cada uno de los destinos turísticos, particularmente en ecosistemas frágiles como arrecifes, bosques, zonas áridas y áreas naturales protegidas.

En general se ha mencionado también que las principales medidas deben ser con el concurso del sector e iniciar con capacitación e involucramiento en el tema (Jackson, 2002).

En el Mediterráneo se ha identificado que una medida de adaptación importante será la modificación de la estacionalidad de las temporadas altas. En Australia se trabaja en reducir al mínimo todos los impactos que reciben los arrecifes coralinos, para incrementar su resiliencia. En zonas costeras con escasez de agua, se han introducido modificaciones para reducir la evaporación de agua en albercas, incrementar las zonas sombreadas e incentivar el uso de agua de mar para sanitarios (Beckens, 2007). Otras iniciativas promueven el impuesto sobre el turismo internacional, así como sobre actividades de gasto elevado de combustible y las estancias de fin de semana. Por otro lado se han planteado incentivos para el ecoturismo, el que promueve el uso de energías limpias, las estancias más prolongadas, las actividades culturales y todas aquellas de bajo consumo de energía (Thompkins *et al.*, 2005).

En México resulta impostergable el saneamiento en las ciudades, que permitirá reducir los impactos sobre el medio ambiente y con ello incrementar la resiliencia de los sistemas, es necesario que en la región norte del país se adopten medidas para enfrentar la escasez y la presión sobre los recursos hídricos y esto incluye al sector turístico en la península de Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Zacatecas, San Luis Potosí y Valle de México. Es necesario que se tomen medidas para reducir el consumo y desperdicio de agua de primer uso en esas entidades en todos los sectores productivos como la agricultura, el turismo, la industria y el uso público urbano. Además, es de suma importancia que se implementen medidas de reúso de agua, saneamiento, reinyección a mantos acuíferos y protección de fuentes de abastecimiento. Se

necesita que los sistemas de vigilancia presten especial atención en las zonas turísticas a los eventos extremos que disminuyen la confianza en la calidad de los recursos de playa y de agua potable. Esto tanto en alimentos como en agua para consumo y en alimentos provenientes del mar. Los lineamientos que el turismo sustentable ha desarrollado se vuelven imprescindibles ante el cambio climático y los impactos que éste puede traer para la industria turística nacional.

8.4 Adaptación en el sector salud

De las lecciones aprendidas a través de diversos desastres naturales, se ha establecido que el sector debe adaptarse a través de:

- a) Fortalecimiento de los sistemas de salud nacionales, regionales y locales
- b) Incremento de la protección contra riesgos de salud-climáticos existentes, mediante sistemas de alarma por contaminación atmosférica, golpes de calor, peligro de epidemias, etc.
- c) Mejora de los determinantes ambientales y sociales que promueven la salud, como mejor provisión de agua potable, saneamiento, las condiciones de vida de las mujeres, indígenas, ancianos, niños y otros grupos vulnerables (OMS, 2008).
- d) Mejora en los sistemas de atención a las emergencias de salud pública, tanto las epidemias como las consecuencias de los desastres naturales, de tal manera que la respuesta sea más rápida y eficiente.
- e) Entrenar a los sistemas de voluntarios, protección civil o sistemas de salud en capacidad de respuesta, atención psicológica de afectados y otros
- f) Entrenar a los sistemas de salud y protección civil en temas de higiene básica, transmisión de enfermedades, seguridad de agua y alimentos, así como ayuda psicológica (Elledge *et al.*, 2007).
- g) Las comunidades tendrán que incrementar ahora su capacidad de adaptación para reducir la vulnerabilidad futura.
- h) Utilización de los datos de epidemiología para revisar si las medidas de adaptación están siendo correctas, de no ser así cambiarlas.
- i) Otros sectores deberán ser informados e involucrados, como el sector de la construcción, el ambiental, protección civil y otros (Ebi *et al.*, 2006).

Otros autores mencionan que la mejor forma de adaptación será a través del crecimiento social y económico de la población, avances tecnológicos, mejores sistemas de seguimiento de salud pública, más detalle epidemiológico e interdisciplinaria en la práctica de salud (Campbell-Lendrum y Woodruff, 2006). Una de las conclusiones más obvias de este análisis es que los datos de muy alta calidad son imprescindibles para reducir la incertidumbre de las decisiones que tomará el sector, ver tabla 8.1. La vigilancia de la calidad del agua para consumo humano será una de las medidas estratégicas para prevenir el impacto a la salud de la población por organismos como *Giardia*, *E. coli* y *Cryptosporidium*, especialmente tras eventos de lluvia intensa (Chiotti *et al.*, 2002).

Tabla 8.1 Medidas de adaptación posibles para reducir los riesgos de salud

	Golpes de calor	Eventos extremos	Enfermedades infecciosas	Smog	Radiación UV
Educación pública y comunicación	<ul style="list-style-type: none"> - Incrementar la toma de conciencia del peligro - Publicar precauciones a tomar 	<ul style="list-style-type: none"> - Proveer información sobre los riesgos - Publicar acciones preventivas tomadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Educar a los residentes, inmigrantes y viajeros de las enfermedades infecciosas, precauciones y síntomas 	<ul style="list-style-type: none"> - Publicar acciones y precauciones a tomar 	<ul style="list-style-type: none"> - Educar al público acerca de los riesgos, prevención y protección
Vigilancia y monitoreo	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar al grupo de población en riesgo - Establecer planes de respuesta y sistemas de alarma 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de alarma de clima 	<ul style="list-style-type: none"> - Vigilancia de los vectores involucrados - Monitoreo y reporte de incidencia de enfermedades 	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar al grupo de mayor riesgo - Establecer monitoreo y alerta para smog - Establecer sistema de reporte de vehículos contaminantes 	<ul style="list-style-type: none"> - Establecer monitoreo UV y un sistema de alerta - Monitorear índices de cáncer de piel - Monitoreo de otros padecimientos relacionados a UV
Intervención en el sistema	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir el efecto de islas de calor 	<p>Planeación de uso de suelo y manejo para minimizar la erosión e inundaciones en áreas sensibles</p>	<p>Control de enfermedades de vectores, eliminación de sitios de anidación de vectores</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener e incrementar los espacios verdes - Reducir el uso de plaguicidas 	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar semillas, plantas y cultivos resistentes a UV - Incrementar sombreado en parques, playas y áreas de esparcimiento
Desarrollo de infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> - Proveer sitios públicos con temperaturas adecuadas - Proveer agua en lugares públicos 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener albergues y desarrollar planes de evacuación - Mantener presas, áreas de inundación y recolección de agua de lluvia - Apoyar programas de seguros 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener adecuados laboratorios de diagnóstico - Implementar laboratorios móviles 	<ul style="list-style-type: none"> - Mejorar sistemas de transporte público y ciclovías - Incentivar la reducción de emisiones y consumo de energía 	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar vidrio resistente a UV para ventanas - Incrementar áreas sombreadas en ciudades y sitios públicos
Tecnología/ Ingeniería	<ul style="list-style-type: none"> - Rediseño y adaptación de las construcciones para hacerlas resistentes al calor y aumentar el confort 	<ul style="list-style-type: none"> - Reforzar e implementar códigos y estándares de construcción 		<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar alternativas para combustibles y vehículos - Reducir emisiones de combustibles fósiles 	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar materiales resistentes a los rayos UV
Intervención médica	<ul style="list-style-type: none"> - Ajustar horarios de trabajo - Establecer planes de emergencia 	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener programas de preparación para desastres 	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar nuevas vacunas y medicamentos - Ofrecer otros programas de vacunación 	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar nuevos criterios de protección por smog 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacitar agentes de salud en el tema

Adaptado de Chiotti *et al.*, 2002

8.5 Adaptación para otros sectores

8.5.1 Agricultura

La agricultura requerirá respuesta rápida a los cambios en los mercados e innovación mercadotécnica y tecnológica. Será necesario el cambio en tipos de cultivos, adaptación a diferentes regiones geográficas, pero también se deberá adaptar para beneficiar la biodiversidad. En México se requerirá introducir el tema del manejo del carbono para incrementar la retención en suelos, lo que a su vez beneficiaría la calidad de los suelos y del agua. Los cambios en uso de suelo y la intensificación de los sistemas de riego pueden tener un efecto mayor sobre la agricultura que la introducción de nuevos cultivos. Algunas de estas medidas son benéficas para la agricultura tanto como para la biodiversidad. Entre ellas están el manejo de los niveles de agua; creación de márgenes no cosechados en los campos de cultivo; reducción de aplicación de plaguicidas y de fertilizantes; restauración de cuerpos de agua y estanques, reparación y manejo de diques y canales, creación de márgenes de hierba en los campos de cultivo. La agricultura puede proteger los cursos de agua y la vegetación de las riberas (Mitchell *et al.*, 2007). Se requerirá de nuevas variedades para la agricultura, que resistan el incremento de temperatura y ozono (Giles, 2008).

Los agricultores y ganaderos pueden desempeñar un papel importante en la reducción de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero sembrando árboles, reduciendo la labranza, aumentando la cobertura vegetal, mejorando la gestión de los pastizales, modificando los forrajes y las variedades de animales y utilizando con mayor eficacia los fertilizantes, lo que redundará en un beneficio a la calidad del agua (FAO, 2008).

Con respecto a la calidad del agua y el cambio climático, las adaptaciones básicas en la agricultura se refieren a las siguientes:

- Cambio en cultivos hacia mayor resistencia al agua salobre o de mala calidad.
- Modificación del tipo de riego para reducir la salinización del agua/suelos.
- Cambio en cultivos o variedades que requieren menos agua.
- Desarrollo de variedades de cultivos resistentes al incremento de temperatura, de tal manera que se limite el uso de plaguicidas.

8.5.2 Sector forestal

Las medidas de adaptación en este sector deberán al mismo tiempo ayudar a resolver el grave problema de la deforestación y plantear propuestas para cambiar la visión de bosque como un recurso natural improductivo en el corto plazo. A nivel nacional la protección de los bosques y la adaptación al cambio climático se determinan mediante las políticas, planes y programas. Se considera importante la inclusión de los siguientes temas:

- Maximizar las contribuciones positivas de los bosques en la calidad del agua.
- Reforzar la reforestación en las zonas riparias.

8.5.3 Biodiversidad

El IPCC en su evaluación de 2007 concluyó que de 20 a 30% de las especies vegetales y animales analizadas hasta ahora están en riesgo mayor de extinción si la temperatura promedio se incrementa de 1.5 a 2.5°C. Este rango de temperatura es similar al esperado en México para los escenarios A2 y A1B, entre el presente y finales de siglo. Los cambios en la fenología (el momento en que ocurren los fenómenos naturales) afecta las interacciones entre los organismos, por ejemplo: presa/predador, polinizadores/temporada de floración, llegada de aves migratorias/existencia de alimento, con lo que se interrumpen los equilibrios entre especies y los servicios de los ecosistemas. Las desviaciones climatológicas fuerzan a los organismos a responder mediante adaptación o migración. Esto lleva al arribo de nuevas especies o la desaparición de otras, por la poca habilidad de adaptación rápida o porque haya fragmentación de hábitat. Esto puede tener otras consecuencias en especies protegidas, plagas o enfermedades por vectores. La composición de comunidades y el funcionamiento del ecosistema se ven afectados por la reducción, desaparición o arribo de población y especies. Sin embargo, los ecosistemas proveen de servicios que mitigan y reducen el efecto del cambio climático, por ejemplo como captadores de carbono, protegiendo la línea de costa o por su efecto regulador en el clima local.

El cambio climático añade un factor adicional de estrés a los ecosistemas, quienes ya están bajo presión por otros causantes de pérdida de biodiversidad como fragmentación del hábitat, especies invasivas, contaminación, sobrepoblación humana y sobredemanda o pastoreo. Sus efectos combinados pueden exacerbar la velocidad y extensión del cambio, así como incrementar la vulnerabilidad del ecosistema. Todos estos efectos combinados ponen a los bienes y servicios ambientales así como a sus beneficios socioeconómicos en riesgo.

Hay cierta esperanza de que las especies se adapten y sobrevivan. Se ha visto que las especies vegetales pueden migrar hasta 100 kilómetros en unos 100 años, lo que les podría ayudar a migrar al clima requerido (Williams *et al.*, 2007). Si en México se espera en el peor de los casos 3°C en 100 años, es necesario que se regionalice en las zonas frías y templadas, de tal manera que se determine cuál es la distancia que las especies arbóreas requieren migrar para sobrevivir al incremento de temperatura. Otras observaciones en arrecifes coralinos demuestran que existen algas que resisten los cambios de temperatura, y que son capaces de sobrevivir en los arrecifes coralinos del Golfo Pérsico o que podría funcionar la colonización asistida (Schorpe, 2008). La velocidad del cambio climático indica que en muchos casos, la diversidad genética local no podrá adaptarse con suficiente rapidez para sobrevivir. El uso mayor de la biodiversidad para los alimentos y la agricultura, en particular microorganismos del suelo, también puede atenuar el cambio climático al reducir la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero. Aprovechar la biodiversidad local puede mantener los bosques en buen estado y la fertilidad de los suelos agrícolas, ambos importantes sumideros de carbono. Por otro lado, la pérdida irreversible de biodiversidad tendrá serias consecuencias para la seguridad alimentaria mundial.

Si se interviene en forma coordinada tanto en el ámbito nacional como en la esfera internacional, la biodiversidad se puede conservar y dirigir a que contribuya a la adaptación de las fuentes generadoras de los alimentos y la actividad agrícola, ante los impactos que impone el cambio climático (FAO, 2008).

Las medidas tradicionales para evitar la pérdida de biodiversidad como la migración asistida y las redes de reservas pueden no ser suficientes (Williams *et al.*, 2007). En la Gran Bretaña se hizo un análisis y se desarrolló un plan de adaptación para la salvaguarda de la biodiversidad del país. Los principios fundamentales para la adaptación son reducir los impactos directos, reducir los impactos indirectos, incrementar la resiliencia de los ecosistemas e introducir cambios de acomodo, que significa estrategias para facilitar el movimiento de especies en el país y brincar barreras naturales y antropogénicas, que puede incluir desarrollar prácticas de manejo de reservas naturales para promover el arribo de especies, incrementar la conectividad para unir hábitat fragmentado, designar zonas de adaptación y otras. En relación a la calidad del agua, aplican dos medidas generales:

- a) Promover las condiciones para el funcionamiento de los ecosistemas. Las especies y hábitat dependen del ambiente físico, así como de la forma de operar de las comunidades biológicas. Esto incluye los ciclos de nutrientes y agua, transferencias de energía, interacciones entre especies como la polinización y la competencia. Un ejemplo de promoción sería el mantenimiento de niveles de agua en humedales o la protección de manglares para proteger la costa y sus procesos.
- b) Reducir las presiones no ligadas a cambio climático. En este tema se incluye el control y manejo de especies invasivas, contaminación y el manejo apropiado. De aquí la importancia ya tratada con anterioridad de trabajar intensamente en la reducción de la contaminación del agua y la eutrofización. Otra acción es la reducción de la presión por parte de las pesquerías, el sobrepastoreo, el uso de plaguicidas y la destrucción de hábitat (Mitchell *et al.*, 2007).

Referencias bibliográficas:

- Beckens S. 2007. Tourism and Climate Change- An Overview. STCRC Climate Change Workshop. Melbourne.
- Campbell-Lendrum D. y R. Woodruff. 2006. Comparative Risk Assessment of Burden of Disease from Climate Change. Environmental Health Perspectives. 114, 12, Diciembre.
- ChangeLab. 2007. Learning for sustainable living. Surrey County Council.
- Chiotti Q., I. Morton, K. Ogilvie, A. Maarouf y M. Kelleher. 2002. Adapting health Infrastructures to Cope with the Health Effects of Climate Change: A Case Study in the Toronto-Niagara Region. Climate Change Action Fund Project A077. Environment Canada. 54 pp.
- Collingwood Environmental Planning y Land Use Consultants. 2006. Climate Change Mitigation and Adaptation Implementation Plan for the Draft South East Plan. South East England Regional Assemble. Surrey. 88 pp.
- Department of the Environment and Heritage. 2005. Climate Change Risk and Vulnerability: Promoting an efficient adaptation response in Australia. Australian Greenhouse Office. 159 pp.

- Ebi K.L., R.S. Kovats y B. Menne. 2006. Approach for Assessing Human Health Vulnerability and Public Health Interventions to Adapt to Climate Change. *Environmental Health Perspectives*. 114, 12, 1930-1934.
- Elledge B.L., D.T. Boatright; P. Woodson, R. E. Clinkenbeard y M.W. Brand. 2007. Learning from Katrina: environmental health observations from the SWCPHP response team in Houston. *Journal of Environmental Health*.
- FAO. 2008. Mitigación del cambio climático y adaptación en la agricultura, la silvicultura y la pesca. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Giles J. 2008. Major food source threatened by climate change. *New Scientist*. No. 2648. 24 Marzo.
- Gobierno del Distrito Federal. 2008. Programa de Acción Climática. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. 70 pp y 3 anexos.
- IPCC. 2007. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Jackson I. 2002. Workshop Report and Plan of Action: Adaptation to Climate Change in the Caribbean tourism Sector Workshop. Grenada. OAS. www.oas.org/macc/Docs/TourismReport.doc
- Jacob J. 2008. ¿El cambio climático afectará el desarrollo social y la calidad de vida en las costas? Segundo Panel internacional sobre cambio climático: La zona costera y su impacto ecológico, económico y social. INECOL, Xalapa, Ver. 16 de octubre.
- Martínez J. 2005. Efectos del Cambio Climático en México. En: ABC de Cambio Climático: Impactos y Acciones en México. Fecha de consulta: 13/10/200/ http://www.portal.sre.mx/uaos/pdf/CC_Julia_2.pdf
- Mitchell R.J., M. D. Morecroft, M. Acreman, H.Q.P. Crick, M. Frost, M. Harley, I.M.D. Maclean, O. Mountford, J. Piper, H. Pointer, M.M. Rehfisch, L.C. Ross, R. J. Smithers, A. Stott, C.A. Walmsley, O. Watts y E. Wilson. 2007. England biodiversity strategy – towards adaptation to climate change. Department for Environment, Food and Rural Areas. United Kingdom. Report No. CR0327. 194 pp
- Organización Mundial de la Salud. 2008. Climate change and health. Secretariat
- Schorpe M. 2008. Mission implausible: Extreme schemes to save the reefs. *New Scientist*, 2678, 28-31.
- Shaw R., M. Colley y R. Connell. 2007. Climate change adaptation by design: a guide for sustainable communities. Town and Country Planning Association, Commission for Architecture and the Built Environment, Environment Agency Asiantaeth yr Amgylchedd, English Partnerships and Royal Institute of Chartered Surveyors. 50 pp.
- Simpson M.C., S. Gössling, D. Scott, C.M. Hall y E. Gladin. 2008. Climate Change Adaptation and Mitigation in the Tourism Sector: Framework, Tools and Practices. UNEP, University of Oxford, UNWTO, WMO: Paris, Francia. 152 pp.
- Thompkins E., S. Nicholson- Cole, L. A. Hurlston, E. Boyd, G. Brooks Hodge, J. Clarke, G. Gray, N. Trotz y L. Varlack. 2005. Surviving Climate Change in Small Islands: A Guidebook. Tyndall Centre for Climate Change Research. University of East Anglia. UK. 128 pp.
- Williams J.W., S. T. Jackson y J.E. Kutzbach. 2007. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 104, 14, 5738-5742.

Anexo 1

Tabla A.1 Modelos de circulación general considerados en la elaboración de los escenarios de cambio climático regionalizados para México (Magaña y Caetano, 2007)

Modelos de circulación general considerados	
A2	A1B
BCM2.0 CGCM3 (T47 resolution) CM3 Mk3.0 ECHAM5-OM ECHO-G CM2.0 CM2.1 E-R CM3.0 CM4 MIROC3.2 medres CGCM2.3.2 PCM CCSM3 HadCM3 HadGEM1 SXG2005	CGCM3 (T47 resolution y T63 resolution) CM3 Mk3.0 ECHAM5-OM ECHO-G FGOALS-g1.0 CM2.0 CM2.1 AOM E-H HadCM3 HadGEM1 SXG2005

Tabla A.2 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2050s y escenario A1B

Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	2	2	2.42
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	2	2.42
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	1	2	2.14
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	2	2	2.28
I. Baja California	3	2	3	2	1	3	2	2.28
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	2	2	2.14
IV. Balsas	3	2	1	1	3	2	2	2
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	2	2	1.71
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	1	2	1.57
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	1	2	1.42
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		2	2	1.5
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	1	2	1.14
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	2	1.14
	2.356-3.14							
	1.58-2.355							
	0.786-1.57							
	0-0.785							

Tabla A.3 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2080s y escenario A1B

Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	2	3	2.57
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	3	2.57
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	1	3	2.28
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	2	3	2.42
I. Baja California	3	2	3	2	1	3	3	2.42
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	1	3	2.14
IV. Balsas	3	2	1	1	3	2	3	2.14
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	2	3	1.85
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	2	3	1.85
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	2	3	1.71
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		2	3	1.67
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	2	3	1.42
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	3	1.28
	2.356-3.14							
	1.58-2.355							
	0.786-1.57							
	0-0.785							

Tabla A.4 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2020s y escenario A2

Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	2	1	2.28
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	1	2.28
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	2	1	2.14
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	2	1	2.14
I. Baja California	3	2	3	2	1	3	1	2.14
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	2	1	2
IV. Balsas	3	2	1	1	3	3	1	2
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	2	1	1.57
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	2	1	1.57
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	2	1	1.42
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		2	1	1.33
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	2	1	1.14
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	1	1
	2.356-3.14							
	1.58-2.355							
	0.786-1.57							
	0-0.785							

Tabla A.5 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2050s y escenario A2

Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	2	2	2.42
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	2	2.42
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	2	2	2.28
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	2	2	2.28
I. Baja California	3	2	3	2	1	3	2	2.28
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	2	2	2.14
IV. Balsas	3	2	1	1	3	3	2	2.14
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	2	3	1.85
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	2	2	1.71
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	2	2	1.57
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		2	2	1.5
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	2	2	1.28
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	2	1.14
	2.356-3.14							
	1.58-2.355							
	0.786-1.57							
	0-0.785							

Tabla A.6 Puntuación promedio del índice de la vulnerabilidad futura obtenida por región hidrológica para la climatología 2080s y escenario A2

Zona administrativa	Presión sobre el recurso	Sobreexplotación	Intrusión salina o salinización	Contaminación		Precipitación	Temperatura	Promedio
				Subterránea	Superficial			
II. Noroeste	3	3	3	2	2	3	3	2.71
VI. Río Bravo	3	3	2	3	2	2	3	2.57
XIII. Valle de México	4	3	1	1	3	2	3	2.42
VII. Cuencas Centrales del N.	3	3	2	3	1	2	3	2.42
I. Baja California	3	2	3	2	1	3	3	2.42
VIII. Lerma-Santiago-Pacífico	3	3	1	1	3	2	3	2.28
IV. Balsas	3	2	1	1	3	3	3	2.28
III. Pacífico Norte	3	1	1	2	1	2	3	1.85
IX. Golfo Norte	2	1	1	2	2	2	3	1.85
X. Golfo Centro	1	1	2	1	2	2	3	1.71
XII. Península de Yucatán	1	1	1	2		2	3	1.67
V. Pacífico Sur	1	1	1	1	1	2	3	1.42
XI. Frontera Sur	1	1	1	1	1	1	3	1.28
	2.356-3.14							
	1.58-2.355							
	0.786-1.57							
	0-0.785							