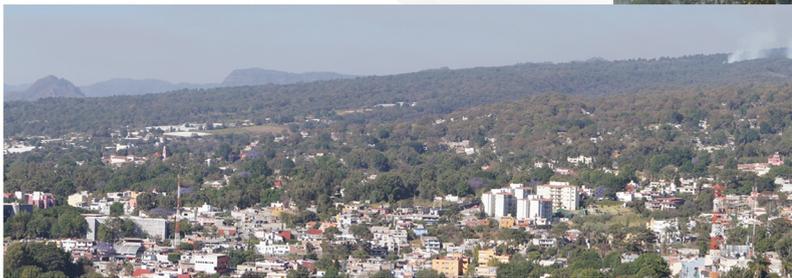


CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos



Ma. Laura Ortiz-Hernández
Enrique Sánchez-Salinas
(comps.)

CAMBIO CLIMÁTICO
Vulnerabilidad de sectores clave
en el estado de Morelos

CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos

Ma. Laura Ortiz-Hernández
Enrique Sánchez-Salinas
(comps.)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Programa de Gestión Ambiental Universitario

Esta publicación fue financiada por Semarnat-CoNACyT, proyecto sectorial 108384 y por el Gobierno del Estado de Morelos.

Cambio climático : Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos / Ma. Laura Ortiz Hernández, Enrique Sánchez Salinas, compiladores.- - Cuernavaca, Mor. : Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Programa de Gestión Ambiental Universitario, 2013.

288 p. : il. col.

ISBN: 978-607-7771-95-1 UAEM

1. Cambios climáticos – México – Morelos (Estado) 2. Cambios climáticos – Aspectos ambientales – México – Morelos (Estado) 3. Cambios climáticos – Aspectos económicos – México – Morelos (Estado) I. Ortiz Hernández, Ma. Laura, comp. II. Sánchez Salinas, Enrique, comp.

LCC QC903.2.M67

DC 363.738740972

Cambio climático. Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos.
Ma. Laura Ortiz-Hernández y Enrique Sánchez-Salinas. Compiladores.

Primera edición, 2013

D.R. © 2012, Ma. Laura Ortiz-Hernández y Enrique Sánchez-Salinas. Compiladores.

D.R. © 2013, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Av. Universidad 1001

Col. Chamilpa

62209, Cuernavaca, Morelos

publicaciones@uaem.mx

Ilustración de portada: Ma. Laura Ortiz-Hernández y Enrique Sánchez-Salinas

Fotografías: Enrique Sánchez-Salinas (caps. 1-5, 6), Benedicta Macedo Abarca (cap. 5) y Horacio Terrazas Hoyos (cap. 7).

ISBN: 978-607-7771-95-1 UAEM

Impreso en México

Reservados los derechos

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTADO DE MORELOS.....	11
Enrique Sánchez-Salinas y Ma. Laura Ortiz-Hernández	
CAPÍTULO 2 ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS.....	25
Andrea Bolongaro-Crevenna Recaséns, Vicente Torres Rodríguez, Jerónimo Chavarría Hernández, Oscar Pohle Morales, Fernando García Vicario y Octavio D. Barahona Echeverría	
CAPÍTULO 3 VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN EL ESTADO DE MORELOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	65
Andrea Bolongaro-Crevenna Recaséns, Vicente Torres Rodríguez, Oscar Pohle Morales, Jerónimo Chavarría Hernández y Fernando García Vicario	
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA BIODIVERSIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS	111
Ramón Pérez Gil Salcido, Victor Hugo Flores Armillas, Alejandro Guevara Martínez, Inés Arroyo Quiroz, Miguel Ángel Linaje Espinosa y Patricia Illoldi Rangel	
CAPÍTULO 5 VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE TEMPORAL AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS	165
Abraham Rojano Aguilar, Ronald Ernesto Ontiveros Capurata y Waldo Ojeda Bustamante	
CAPÍTULO 6 VULNERABILIDAD EN SALUD ASOCIADA A LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS	213
Magali Hurtado Díaz, Luis Antonio Arias Medellín y Horacio Riojas Rodríguez	
CAPÍTULO 7 APROXIMACIONES RECIENTES AL ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TURISMO. EL CASO DE CUERNAVACA	261
Rafael Monroy-Ortiz, Jacinto Mariscotti Rodríguez Santana y Rafael Monroy	

PRESENTACIÓN

Durante las últimas dos décadas se han llevado a cabo diversas investigaciones acerca del impacto observado y potencial del cambio climático sobre los sistemas naturales y sociales. Esta investigación ha dado como resultado un avance en el conocimiento científico acerca del tema, lo cual ha evidenciado la necesidad de formular e implementar políticas públicas que limiten los impactos adversos del cambio climático.

El cambio climático es un fenómeno bien identificado actualmente y se le reconoce como el cambio del clima atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas, que alteran la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima. En el año 2007, la evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático reporta dos conclusiones, las cuales están teniendo una marcada influencia en la emisión de políticas públicas. La primera afirma que el cambio climático es inequívoco y se debe en buena medida a las emisiones de gases de efecto invernadero que se generan por las actividades humanas. La segunda indica que los efectos del calentamiento global (aumento de la temperatura media del planeta) pueden ser detectados en cada continente a través de diferentes manifestaciones.

Ante este panorama, es necesario establecer estrategias que conlleven a la mitigación de gases de efecto invernadero y a establecer medidas de adaptación ante el cambio climático. Para realizar ambas estrategias, en el caso de la mitigación, se requiere en primer término, contar con un inventario de gases de efecto invernadero, el cual ha sido concluido para el estado de Morelos.

Para la adaptación, es necesario construir escenarios de variabilidad climática (simulaciones por computadora del clima futuro), para predecir los cambios que podrían presentarse. La generación de los escenarios climáticos proporciona una idea de cómo se comportará el clima en un futuro, de cuánto la temperatura podría aumentar, si las lluvias aumentarán o disminuirán y si habrá más ondas de calor o eventos de lluvias fuertes. Esto se convierte en una gran herramienta cuando conocemos los posibles impactos de cambios del clima en la vida humana, en la infraestructura, en las formas de vida y en los ecosistemas, permitiéndonos crear planes de adaptación de largo plazo e identificar riesgos futuros. De esta forma podemos reducir nuestra vulnerabilidad y riesgo ante posibles desastres que pueden resultar en la pérdida de vidas humanas, aunado a fuertes pérdidas económicas y daños a la infraestructura. Estos supuestos tendrán una influencia importante sobre diferentes actividades que se establezcan en el estado de Morelos, ya que representan el contexto en el cual se analizan los impactos del cambio climático, la vulnerabilidad y la adaptación.

Por lo tanto, es importante realizar estudios de vulnerabilidad en sectores clave, ya que ha surgido como un tema transversal en la investigación sobre las dimensiones humanas del cambio ambiental global. El diagnóstico de la vulnerabilidad es el elemento clave para proyectar impactos y, por lo tanto, es un paso previo indispensable en el diseño de políticas públicas de adaptación. Sin embargo, la vulnerabilidad al cambio climático tradicionalmente se ha estudiado de manera aislada de otros factores de estrés, incluyendo los cambios estructurales asociados con la globalización económica. La evaluación de la vulnerabilidad identifica y caracteriza quién y qué es sensible a los riesgos del cambio climático, además del porqué; caracteriza la capacidad de adaptación y sus determinantes, e identifica oportunidades para la adaptación.

Estos resultados son la base para establecer medidas de adaptación ante el cambio climático en el estado de Morelos, misma que se entiende como ajustes en los sistemas naturales, humanos, productivos e infraestructura estratégica a estímulos climáticos proyectados o reales, y cobra cada vez más importancia para México y Morelos, pues se reconoce la alta vulnerabilidad a anomalías climáticas.

En este libro se concentra información acerca de los escenarios climáticos para el estado de Morelos y el análisis de vulnerabilidad del agua, la biodiversidad, la agricultura de temporal, la salud y el turismo. Para llevar a cabo este trabajo, un grupo de especialistas se reunieron para conjuntar esfuerzos y realizar el presente estudio, lo que ha permitido intercambiar experiencias y definir potencialidades en el tema del cambio climático en la entidad. Esta obra presenta en el primer capítulo, un resumen de los principales aspectos físicos, biológicos y sociodemográficos del estado de Morelos, en el capítulo 2 se reportan y analizan los escenarios del clima para los años 2020, 2050 y 2080. Del capítulo 3 al 7 se realiza el análisis de vulnerabilidad de los sectores agua, biodiversidad, agricultura, salud y turismo, respectivamente.

Los compiladores agradecen el trabajo realizado por las personas que contribuyeron para la conclusión de esta obra, incluyendo autores, coautores y revisores de cada capítulo. También se agradece el apoyo otorgado por los fondos SEMARNAT-CONACYT (proyecto 108384), que hicieron posible la impresión de este libro.

A traditional stone oven with a thatched roof and a chimney, set in a rural landscape. The oven is built from dark stone and has a large, rounded, thatched roof made of dried grass or straw. A small, reddish-brown chimney is visible on top. The oven is situated on a circular stone base. The background shows a lush, green landscape with hills and a cloudy sky.

**DESCRIPCIÓN GENERAL
DEL ESTADO DE MORELOS**

**1
CAPÍTULO**

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTADO DE MORELOS

Enrique Sánchez-Salinas^{1*}
Ma. Laura Ortiz-Hernández*

Aspectos físicos

El estado de Morelos está situado geográficamente entre los paralelos 18°20'02" y 19°07'51" de latitud norte y los meridianos 99°37'08" y 99°30'21" de longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich (Aguilar *et al.*, 2006). Cuenta con un área superficial de 4,961 km² y representa el 0.2% de la superficie del país. Por lo anterior, ocupa el lugar número en extensión territorial a nivel nacional (INEGI-Gobierno de Morelos, 2010). Está dividido en 33 municipios; el más reciente es el de Temoac, que en 1977 logró constituirse en municipio al separarse de Zacualpán de Amilpas (Figura 1.1). De los 33 municipios, 31 tienen un nombre de origen náhuatl, derivado de la presencia nahua en el estado. Sólo Emiliano Zapata y Ayala tienen nombres relacionados con el movimiento revolucionario de 1910.

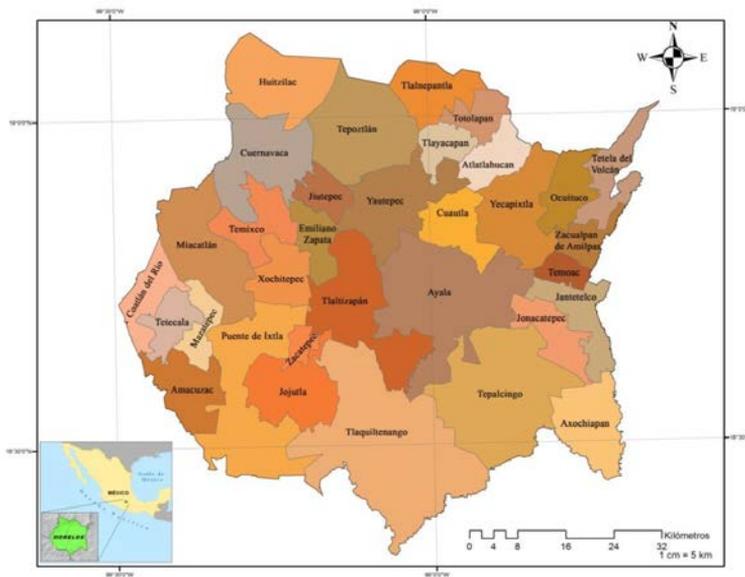


Figura 1.1. Localización geográfica del estado de Morelos.

^{1*} Centro de Investigación en Biotecnología y Programa de Gestión Ambiental Universitario, Universidad Autónoma del Estado de Morelos

Las formas del relieve del estado presentan variadas altitudes que van desde 3,000 msnm, en las sierras del norte en los límites con el Distrito Federal, hasta los 850 msnm en la parte de la región de Huaxtla, municipio de Tlaquiltenango y algunas zonas de los márgenes del río Amacuzac (Aguilar, 2000a y 2000b).

Desde el punto de vista fisiográfico, Morelos corresponde a la unidad orogénica del Eje Neovolcánico o Sistema Volcánico Transversal en su parte alta al norte, y se vincula con la región geomórfica llamada Depresión o Cuenca del Balsas en su región más baja al centro sur (Aguilar, 2000b; Boyás *et al.*, 2001).

En el estado de Morelos se presentan numerosas corrientes que siguen la pendiente de norte a sur. Las corrientes de aguas superficiales que corresponden a la cuenca del Amacuzac son los ríos Cuautla, Yautepec, Tembembe, Apatlaco, Alto Amacuzac y Bajo Amacuzac y cubren en su conjunto el 86.784% de la superficie estatal. La única subcuenca intermedia del Atoyac es la del río Nexapa, la cual cubre por su parte el 13.26% del territorio estatal (Aguilar, 2000b; Delgadillo, 2000). Morelos queda comprendido en una porción de la región hidrológica río Balsas que tiene un área de aportación de 117,405 km², los que representan 5.8% del área total de la República Mexicana (Avalos y Palerm, 2003).

Clima. El estado de Morelos se caracteriza por presentar una gran diversidad climática, así, de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1987), para la entidad se han determinado los siguientes tipos de climas (Taboada *et al.*, 2009): frío, semifrío, templado subhúmedo, semicálido y cálido. De todos estos climas, el cálido subhúmedo con lluvias en verano es el que cubre la mayor superficie estatal.

Los valores más altos de precipitación para el estado de Morelos se registran en las estribaciones de la sierra Chichinautzin y los límites superiores de Huitzilac y las lagunas de Zempoala, así como en las faldas del volcán Popocatepetl con precipitaciones anuales superiores a 1500 mm (Taboada *et al.*, 2009). En las partes altas de las sierras Chichinautzin y Zempoala y el volcán Popocatepetl, la precipitación supera a la evapotranspiración, lo que favorece la recarga de acuíferos en los valles de Cuernavaca, Cuautla y Yautepec (Jaimes-Palomera *et al.*, 1989 ; Vázquez *et al.*, 1989). Una precipitación promedio anual de 876 mm para el estado de Morelos, corresponde a un volumen medio anual de 4,328 millones de metros cúbicos (Breña, 2004).

Para el caso de la temperatura en la entidad, las estaciones termopluviométricas reportan al mes de enero como el más frío. Los valores más bajos se reportan para localidades de los municipios de Tetela del Volcán y de Huitzilac con 6.7 y 7.5°C, respectivamente. En las localidades de Tilzapotla y Xicatlacotla, se presentan las temperaturas promedio más altas con 29.6°C y 29.1°C, respectivamente. Los meses de abril y mayo son los más calientes (Taboada *et al.*, 2009).

La combinación de la altitud, la latitud y la topografía del estado de Morelos han dado como resultado el establecimiento de cinco zonas térmicas: Zona Fría, Zona Semifría, Zona Templada, Zona Semicálida y Zona Cálida (Taboada *et al.*, 2009).

Vientos. El estado de Morelos se encuentra dentro de la zona de dominio de los vientos alisios del hemisferio norte, mismos que durante el verano son fuertes y profundos, convirtiéndose en precipitación, debido a los movimientos convectivos del aire en el fondo de los valles y al enfriamiento por expansión adiabática que experimenta al ascender las laderas montañosas (Vidal, 1980). Los vientos superficiales de la entidad siguen una trayectoria poco variable a lo largo del año, determinada por el relieve (Aguilar, 1990). La región meridional de la entidad es la más seca como consecuencia de que los vientos dominantes advectivos que se desarrollan en la misma, tienen la mayor parte del año una trayectoria de oeste a este (Rendón y Fernández, 2007).

Suelos. El estado de Morelos está caracterizado por la presencia de diferentes unidades edáficas, entre las cuales se pueden mencionar: Feozems, Andosoles, Regosoles, Fluvisoles, Leptosoles, Arenosoles, Vertisoles, Castañozems, Cambisoles, Chernosems, Acrisoles, Litosoles, Rendzinas, Luvisoles, Arenosoles y Fluvisoles (Aguilar, 2000a y 2000b). El porcentaje de la superficie del estado de Morelos que ocupa cada unidad edáfica se muestra en la figura 1.2.

Hidrología. Las condiciones interrelacionadas del relieve, de las rocas y del clima en Morelos le confieren una situación hidrológica privilegiada si se comparan con las características medias del país. El estado de Morelos se encuentra localizado en su totalidad dentro de la gran cuenca del río Balsas (Región Hidrológica No. 18), una de las más grandes del país. Morelos es el único estado que se encuentra inserto dentro de esta gran cuenca en su totalidad y se ubica específicamente en la porción denominada Alto Balsas. A su vez la cuenca del río Balsas está compuesta por cuencas más pequeñas de las que resaltan, las cuencas de los ríos Amacuzac y Nexapa. La mayor parte del estado de Morelos se encuentra dentro de la cuenca del río Amacuzac (87% de su territorio) y el resto en la cuenca del río Nexapa (Aguilar, 2000b). El estado de Morelos comprende siete cuencas (Tabla 1.1).

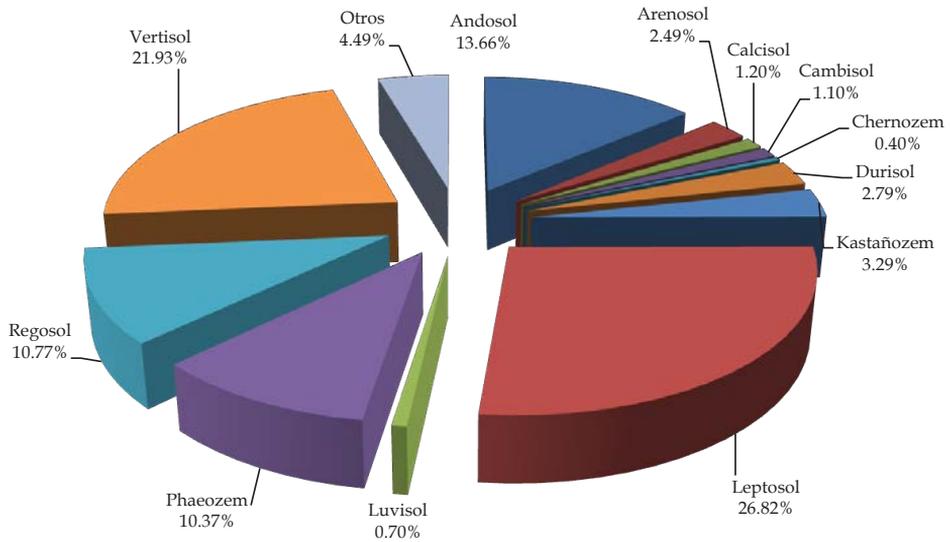


Figura 1.2. Porcentaje de la superficie del estado de Morelos por unidad edáfica (INEGI-Gobierno de Morelos, 2010).

Tabla 1.1. Distribución territorial de las cuencas en el estado de Morelos (CONAGUA, 2010).

Cuenca	Superficie		Municipios	
	Km ²	%	Número	Capital
Apatlaco	659	13.3	13	8
Yautepec	1249	25.2	18	8
Cuautla	992	20	15	5
Nexapa	654	13.2	7	6
Tequesquitengo	30	0.6	3	-
Chalma-Tembembe	485	9.8	8	5
Amacuzac	888	17.9	7	1
Total	4958	100		33

Para el caso de las aguas subterráneas, la dirección predominante del flujo de agua subterránea es norte-sur y norte-suroeste. En el estado de Morelos existen cuatro

acuíferos alojados en los valles de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Axochiapan-Tepalcingo y Zacatepec.

Geología. De acuerdo con Aguilar (1990 y 2000a), en el estado de Morelos predominan las rocas ígneas cuaternarias, en su mayor parte extrusivas. Entre ellas destacan los basaltos, las andesitas y las riodacitas. Las rocas piroclásticas son también comunes. El estudio de la estratigrafía pone de manifiesto la disposición y estructura de 22 formaciones y grupos de rocas que se han localizado en la corteza terrestre del estado de Morelos, en el transcurso de los millones de años de su historia geológica, a partir del Cretácico Inferior hasta el Holoceno. Algunas de las principales formaciones y grupos de rocas morelenses son: Formación Xochicalco, Formación Morelos, Formación Cuautla, Formación Mexcala, Grupo Balsas, Riolita Tilzapotla, Grupo Buenavista, Formación Tlaica, Granito Colotepec, Formación Tepoztlán, Grupo Ixtlilco, Grupo Tepexco, Formación Cuayuca, Granodiorita Jantetelco, Diorita Xalostoc, Andesita Zempoala, Riodacita Popocatépetl, Formación Tlayecac, Formación Cuernavaca y Grupo Chichinautzin.

Aspectos biológicos

Regionalización ecológica y biogeográfica. Con base en el sistema de seis regiones biogeográficas, el estado de Morelos se sitúa justo en la Zona de Transición Mexicana de Montaña o Región Mesoamericana de Montaña, entre las regiones Neártica y Neotropical (Challenger y Soberon, 2008; Aguilar, 2000b; Boyás *et al.*, 2001). Al norte del estado le corresponde la región Neártica, cuya vegetación predominante son algunas variantes de bosques y matorrales de clima frío y templado. Entre los grupos característicos de esta región están las coníferas, como pinos (*Pinus*), oyameles o abetos (*Abies*) y enebros (*Juniperus*), además de los encinos (*Quercus*). Al sur de la Sierra Volcánica Transversal se ubica la región Neotropical con vegetación propia de climas cálidos y húmedos, donde predomina la selva baja caducifolia hacia el centro y sur del territorio morelense (Delgadillo, 2000).

El estado de Morelos se sitúa en la zona de transición de dos provincias biogeográficas. La primera corresponde a la Provincia del Eje Neovolcánico, es un área muy compleja en origen y medio físico; por ello, casi todos los tipos de vegetación están presentes, aunque predominan los bosques de coníferas y de encinos. El resto del área está compuesto por pastizales, matorrales subalpinos, bosques mesófilos (en áreas de cañadas), vegetación ribereña y tierras urbanas y de cultivo. La presencia de matorrales xerófilos y selva baja caducifolia en ocasiones se debe a la presencia de derrames lávicos y en otros casos debido al efecto de sombra pluvial, sobre todo en las zonas de contacto con provincias vecinas. La segunda provincia es la del Balsas, es un área extensa confinada por el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur, elevaciones que producen un doble efecto de sombra lluviosa. Por ello, la vegetación más ampliamente distribuida

es la selva baja caducifolia y su ecotono con los bosques de encinos. Hay gran cantidad de endemismos que dan identidad a esta área como una provincia (Benítez *et al.*, 1998; Espinosa *et al.*, 2008).

Tipos de vegetación. Para el estado de Morelos se reconocen los siguientes tipos de vegetación: bosques de coníferas, bosque de *Quercus*, bosque mixto pino-encino, bosques mesófilos de montaña, Selva baja caducifolia y bosque de galería o bosque perennifolio ripario y deciduo (Vega *et al.*, 2008; Arias 2007; Bonilla y Villaseñor, 2006; Contreras-McBeath *et al.* 2006; Boyás *et al.* 2001; Monroy y Maldonado, 1990).

Biodiversidad y riqueza de especies. El concepto de biodiversidad se refiere en general a la variabilidad de organismos vivos; incluye los ecosistemas terrestres y acuáticos, los complejos ecológicos de los que forman parte, así como la diversidad entre las especies y dentro de cada especie. La biodiversidad abarca, por lo tanto, tres niveles de expresión de variabilidad biológica: ecosistemas, especies y genes (Pérez-Gil, 1998; Neyra y Durand; 1998 y ONU, 1992). Cordero y Morales (1998) señalan que la diversidad de especies se refiere al número de especies diferentes que conviven en un área geográfica determinada. Generalmente se hace referencia a la riqueza de especies de un grupo o taxón particular.

En el estado de Morelos se ha avanzado mucho en el conocimiento de su biodiversidad, sobre todo en lo referente a los grupos más conspicuos como los hongos, las fanerógamas y los vertebrados. Sin embargo, varios grupos de plantas y animales han sido poco estudiados e incluso algunas regiones no han sido lo suficientemente exploradas desde el punto de vista botánico y zoológico. Respecto a los microorganismos e invertebrados todavía falta mucho por conocer (Contreras-McBeath *et al.*, 2006). A continuación se presentan algunos datos que pretenden sintetizar la existencia de los diferentes grupos taxonómicos estudiados en la entidad.

1. El estado de Morelos cuenta con el 10% de las especies de plantas de México
2. Cuenta con el 33% de las especies de aves de México
3. Posee el 14% de reptiles
4. Tiene el 21% de especies de mamíferos de México
5. Con 10% de los artrópodos de México
6. Lugar 17 por la riqueza de especies en el país
7. Numerosas especies endémicas
8. Posee especies de importancia económica y cultural, así como algunas en peligro de extinción, como es el caso del conejo de los volcanes, endémico del eje neovolcánico transversal.

Aspectos socioeconómicos

Población. Morelos es uno de los estados más pequeños de la República Mexicana, y sólo Tlaxcala y el Distrito Federal tienen dimensiones menores. En correspondencia con su extensión y de acuerdo con los datos del Censo de Población y Vivienda 2010, Morelos ocupa el lugar vigésimo tercero entre las entidades del país. Sin embargo, es el tercer estado en cuanto a densidad de población, con 364.3 habitantes/km², sólo después del Distrito Federal y el Estado de México. La dinámica poblacional del estado de Morelos se muestra en la figura 1.3. El crecimiento demográfico del estado de Morelos ha tenido durante el período 1950-2010 una clara tendencia hacia un crecimiento sostenido al pasar de casi 300 mil habitantes en 1950, a casi un millón en 1980 y un millón 777 mil en 2010, es decir, un incremento de aproximadamente 1 millón 400 mil habitantes en 60 años. Si bien el incremento fue constante a lo largo de todo el período, las tasas de crecimiento han sido variadas e inclusive en decremento en algunas décadas. Si bien de 1950 a 1980 las tasas fueron definitivas en su incremento, es a partir de 1980 que el comportamiento toma un parte-aguas al bajar sus niveles de crecimiento en forma constante hasta el año 2010 (Figura 1.3A). Actualmente, Morelos cuenta con un total de 1,777,227 habitantes, con una tasa de crecimiento anual del 2% (Figura 1.3B); el 84% de la población es urbana y el 16% es rural; el 48.3% son hombres y el 51.7% son mujeres (INEGI, 2011).

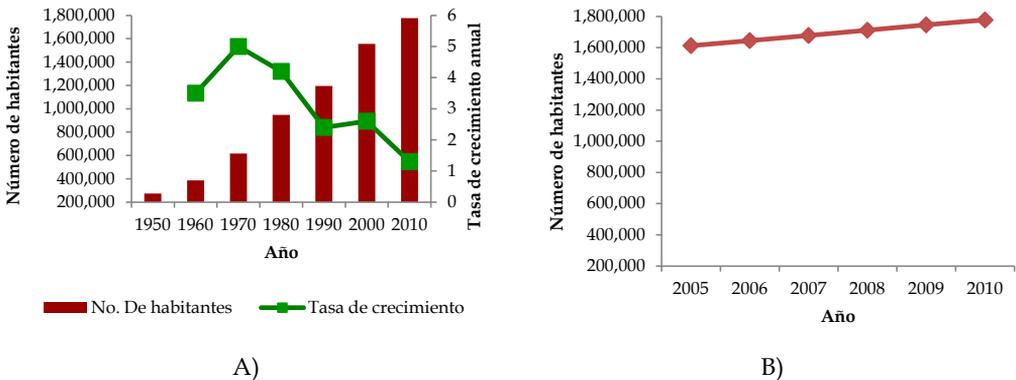


Figura 1.3. Población del estado de Morelos. A) período 1950-2010; B) período 2005-2010 (INEGI, 2011).

Educación. La proporción de la población analfabeta de 15 años o más para el período 2005-2010 fue de 6.4%, por abajo de la media nacional (6.9%). Respecto a la proporción de la población de 5 a 14 años que asiste a la escuela en el período 2005-2010, Morelos ocupó el lugar 26 con 93.6%, por abajo de la media nacional con un valor de 94%

(INEGI, 2011). La estructura de la población de 15 años y más por nivel de instrucción se presenta en la tabla 1.2.

Salud. En cuanto a indicadores de los servicios médicos de las instituciones públicas en el estado de Morelos, para el año 2009 se contaba con 1.5 médicos por cada mil habitantes, 0.4 médicos generales o familiares por cada mil habitantes y 0.8 médicos especialistas para la misma población. Para el mismo año de 2009, por cada mil habitantes se contaba con 16.4 unidades de consulta externa, 0.8 unidades de especialidad y 0.5 camas censables. Además, se contaba con 6 consultorios por cada diez mil habitantes y 2.4 quirófanos por cada cien mil (INEGI, 2011).

Tabla 1.2. Estructura de la población de 15 años y más por nivel de instrucción, período 2005-2010.

Nivel de Instrucción	Porcentaje de la población	
	Estatal	Nacional
Sin escolaridad	6.9	6.9
Educación básica	54.7	56.1
Estudios técnicos o comerciales con primaria terminada	0.4	0.6
Educación media superior	20.6	19.3
Educación superior	17.0	16.5

Fuente: INEGI, 2011.

Empleo. En cuanto a la proporción de la población de 14 años y más de edad, disponible para la actividad económica, tuvo un valor de 58.6%, superior al promedio nacional (58.0%). Sin embargo, para el primer trimestre del 2011, la tasa neta de participación económica por sexo presentó un comportamiento heterogéneo, 73.5% para hombres y 42.1% para mujeres. La población económicamente activa es de 57% y la proporción de esta población ocupada para el estado de Morelos fue de 95.9% (INEGI, 2011). En el estado de Morelos la población ocupada para el primer trimestre de 2011 fue de 11.5% en el sector primario, 23.2% en el sector secundario, 65.1 para el sector terciario y 0.2% no especificado. De acuerdo al nivel de ingresos, el 30.3% percibe hasta dos salarios mínimos, 30.5% más de dos a cinco salarios mínimos, 6.1% no recibe ingresos y 3.5% percibe más de cinco salarios mínimos (INEGI, 2011).

El Producto Interno Bruto (PIB). El PIB del estado de Morelos ascendió de 90.33 millones de pesos a 96.91 millones de pesos del año 2003 al 2009. Para el año 2009, Morelos participaba con el 1.1% del PIB nacional y ocupaba el lugar número 27 a nivel nacional (Figura 1.4).

Índice de Desarrollo Humano (IDH). La información más reciente ubica a Morelos entre los estados con desarrollo humano alto (IDH mayor o igual a 0.80). Su posición en la clasificación nacional ha mejorado, al pasar de 0.78 en el año 2000 a 0.82 en el año 2008 (Figura 1.4).

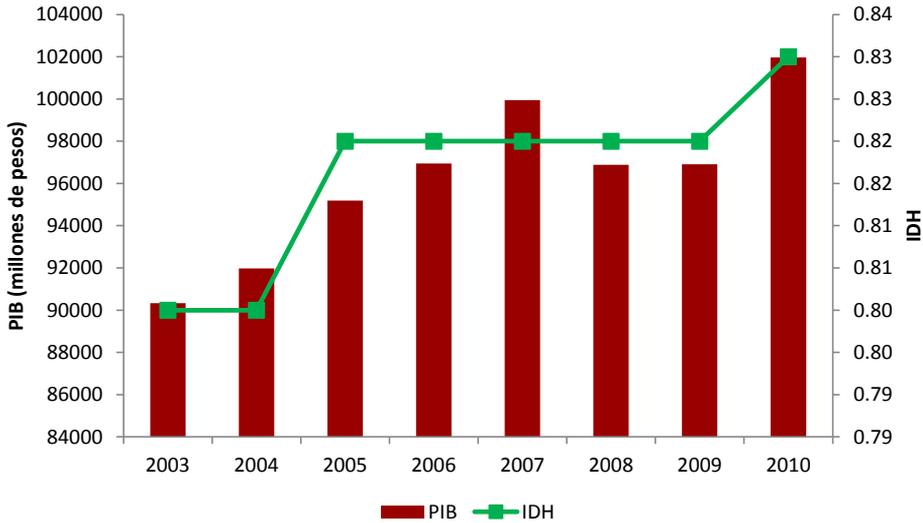


Figura 1.4. Producto Interno Bruto e Índice de Desarrollo Humano del estado de Morelos (INEGI, 2011).

Referencias bibliográficas

- Aguilar B. S. (1990). Dimensiones ecológicas del estado de Morelos. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. UNAM. México. 221 pp.
- Aguilar B. S. (2000a). Cartas del medio físico, biológico y humano. En: Rueda H.R. (Coord). Atlas de Morelos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Editorial Praxis. Mexico. pp 169-215.
- Aguilar B. S. (2000b). Naturaleza, formas y estructuras de un paisaje contrastante. En Delgadillo M.J. (coord.) Contribuciones a la investigación regional en el estado de Morelos. UNAM. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. Cuernavaca. pp 69-107.
- Aguilar B. S., Sorani V. y Rueda R. (2006). Situación geográfica del estado de Morelos. En: Rueda H. R. (coord.) Atlas Municipal del Estado de Morelos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Editorial Praxis. México. p. 61.
- Arias D. (2007) La selva baja caducifolia de Morelos. *Inventio*. 6: 13-16.

- Avalos G. C. y Palerm V. J. (2003) Competencia por el agua entre usos y usuarios en la cuenca del río Cuautla, Morelos, México. *Comunicaciones en Socioeconomía, Estadística e Informática*. 7 (2): 107-131.
- Benítez D. H., Vega L. E., Peña J. A. y Ávila F.S. (1998). *Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Instituto Nacional de Ecología. México, 204 pp.
- Bonilla J. R. y Villaseñor J. L. (2006) Tipos de vegetación en el estado de Morelos. En: Rueda H.R. (coord.) *Atlas Municipal del estado de Morelos*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Editorial Praxis. México, 125-158 pp.
- Boyás D. J., Cervantes S. M., Javelly G. J., Linares A.M., Solares A.F., Soto E. R., Naufal T. I. y Sandoval C. L. (2001). Diagnóstico forestal del estado de Morelos. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. *Publicación Especial No. 7*. 2^{da}. Edición. 180 pp.
- Breña A. F. (2004). *Precipitación y recursos hidráulicos en México*. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 316 pp.
- Challenger A. y Soberón J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En Sarukhan J. (coord.). *Capital natural de México*, vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, pp. 87-108.
- CONAGUA (2010). Programa Hídrico visión 2030 del Estado de Morelos. Serie Planeación Hidráulica en México. Componente: Planeación regional y estatal. SEMARNAT. México, 172 pp.
- Contreras-McBeath E. T., Bonilla B. J. R., Boyás D. J. C., Bustos Z. G., Caspeta M. J. M., Castro F. R., Lozano G. M. A., Martínez T. J. I., Mejía M. H., Ortiz V. A. L., Portugal P. D., Trejo A. R., Trejo L. A. y Urbina T. F. (2006). Capítulo 3. Biodiversidad. En Contreras-McBeath T., Boyás J. C., Jaramillo F. (editores). *La Diversidad Biológica en Morelos: Estudio del Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos, México, pp. 31-58.
- Cordero C. y Morales E. (1998). Panorama de la Biodiversidad de México. Conabio. Manuscrito. Corredor Biológico Mesoamericano. *Biodiversitas* 47:8-13.
- Delgadillo M. J. (2000). Morelos: indicadores básicos de su desarrollo. En Delgadillo M. J. (coord.) *Contribuciones a la investigación regional en el estado de Morelos*. UNAM. Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias. Cuernavaca. pp 19-68.
- Espinosa D. O., Ocegueda S. C., Aguilar C. Z., Flores O. V. y Llorente-Bousquets J. (2008). El conocimiento biogeográfico de las especies y su regionalización natural. En Sarukhan J. (coord.). *Capital natural de México*, vol. I: *Conocimiento actual de la biodiversidad*. CONABIO, México, pp. 33-65.
- INEGI (2011). *Perspectiva estadística Morelos*. Ags. 90 pp
- INEGI-Gobierno de Morelos (2010). *Anuario estadístico, Morelos*. Ags. (Última actualización al 6 de mayo de 2011)

- Jaimes-Palomera L. R., Cortes-Silva A., Vázquez-Sánchez E., Aravena R., Fritz P. y Drimmie R. (1989). Geoquímica isotópica del sistema hidrogeológico del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Geofísica Internacional* 28(2): 219-224.
- Monroy R. y Maldonado B. (1990). El aprovechamiento de los recursos florísticos de la selva baja caducifolia en Morelos, México. En: Leff E., Carabias J. y Batis (coords). Recursos Naturales, técnica y cultura. Estudios y experiencias para un desarrollo alternativo. Serie Seminarios 1. Centro de investigaciones Multidisciplinarias en Humanidades. UNAM. 253-264.
- Neyra L. y Durand L. (1998). Biodiversidad. En: CONABIO. La diversidad biológica de México: Estudio de País
- ONU (1992). Convenio Sobre la Diversidad Biológica, Nueva York. 30 pp.
- Pérez-Gil S. R. (1998). Una contribución para la comprensión de los usos, valores y tipos de importancia que representan los vertebrados terrestres de México. En Benítez D. H., Vega L. E., Peña J. A. y Ávila F.S. (Editores) (1998). Aspectos económicos sobre la biodiversidad de México. Tema III: Especies 92 Y Genes. Aspectos Económicos Sobre La Biodiversidad De México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad/Instituto Nacional de Ecología. México, pp 89-110 pp.
- Rendón C. A. y Fernández N. R. (2007) Plantas con potencial uso ornamental del estado de Morelos, México. *Polibotánica*. 023: 121-165.
- Taboada S. M., Granjeno C. A. y Oliver G. R. (2009). Normales climatológicas (temperatura y precipitación) del estado de Morelos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca. 258 pp.
- Vázquez S. E., Cortes A. Jaimes P. R., Fritz P., y Aravena R. (1989). Hidrogeología isotópica de los valles de Cuautla y Yauhtepec, México. *Geofísica Internacional* 28(2): 245-264.
- Vega G.A., López-García J. y Manzo D.L. (2008) Análisis espectral y visual de vegetación y uso del suelo con imágenes Landsat ETM+ con apoyo de fotografías aéreas digitales en el Corredor Biológico Chichinautzin, Morelos, México. *Investigaciones Geográficas*. 67: 59-75.
- Vidal R. (1980). Algunas relaciones clima-cultivo en el estado de Morelos. Instituto de Geografía. UNAM, México. 95 pp.
- Aguilar B. S. (2000a). Cartas del medio físico, biológico y humano. En: Rueda H.R. (coord.) Atlas de Morelos. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Editorial Praxis. México. pp 169-215.



**ESCENARIOS DE
CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL ESTADO DE MORELOS**

2

CAPÍTULO

CAPÍTULO 2

ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS

Andrea Bolongaro-Crevenna Recaséns^{2*}

Vicente Torres Rodríguez*

Jerónimo Chavarría Hernández*

Oscar Pohle Morales*

Fernando García Vicario*

Octavio D. Barahona Echeverría*

Introducción

Las condiciones extremas en el clima afectan la vida del planeta. Dependiendo de la intensidad y duración de una anomalía en la lluvia o la temperatura, así como el grado de vulnerabilidad de una sociedad o de un ecosistema, los impactos del clima pueden variar de imperceptibles a catastróficos.

Las alteraciones del clima que tienen lugar con el tiempo definen lo que es la variabilidad climática. Dentro de este contexto, se definen dos términos muy recurrentes en la literatura en la actualidad: anomalías y cambio climático. El primero se refiere a desviaciones respecto a las condiciones medias de una variable del sistema climático; mientras que el segundo se refiere a "un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables" (CMNUCC, 1992).

Actualmente, el término calentamiento global tiene una relevancia y permanencia en los medios de difusión como ningún otro tema científico y es de mucho interés en las políticas públicas de la mayoría de los estados, y es que no es para menos. La humanidad se encuentra en una encrucijada en la que si no se actúa para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de inmediato, se elevarán a un "punto sin retorno" en el cual los cambios climáticos tendrán consecuencias catastróficas para la humanidad: aumento de la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos peligrosos (lluvias intensas, sequías, ciclones tropicales), incremento del nivel de mar, derretimiento de los glaciares y hielo polar, surgimiento de plagas y enfermedades asociadas a los aumentos de temperatura en áreas no frecuentes, entre otros.

^{2*} Investigadores de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo

En México, la vulnerabilidad de la población a extremos del clima es elevada. Dado que una vasta parte del territorio es semiárido, los cambios en la temporada de lluvias resultan en amenaza de sequía y con frecuencia en desastres para sectores dependientes del agua. A su vez, el país tiene amplias zonas costeras hacia el océano Pacífico y hacia el Golfo de México que resultan muy sensibles y ampliamente vulnerables de sufrir las consecuencias de los fenómenos hidrometeorológicos extremos y el aumento del nivel del mar.

En este capítulo se describirá el análisis de la variabilidad climática en el estado de Morelos y de los escenarios de cambio climático de la región para los años 2020, 2050 y 2080.

Metodología

Datos y procesamiento

Para el presente estudio se recopilaron datos diarios de precipitación, temperatura mínima, temperatura máxima y temperatura media de 164 estaciones meteorológicas pertenecientes a la Red de Monitoreo Meteorológico de la Comisión Nacional del Agua (CNA) de Morelos y sus alrededores. Se creó una base de datos climatológicos, la cual se integró en archivos de hoja de cálculo en el programa Excel de Microsoft®. Posteriormente, se realizó un análisis de la calidad de los datos utilizando la metodología seguida por Díaz (2006), que se basa en verificar la calidad mediante el programa R-Climdex (Zhang y Yang, 2004).

Una vez revisada la calidad, la coherencia de la información y la longitud de la serie de datos, se eligieron las estaciones cuyos datos cumplieran con las características requeridas para el análisis, quedando así un total de 28 estaciones climáticas útiles (Tabla 2.1 y Figura 2.1).

El período seleccionado como línea base fue 1961-2008 que comprende un total de 48 años que representan 576 meses. Con los datos diarios (escala temporal más pequeña con que se cuenta) se calcularon las medias mensuales en el caso de las temperaturas y la suma mensual en el caso de la precipitación. El criterio que se tuvo en cuenta consistió en que como máximo le faltara el 10% de los meses, lo cual representa 58 meses de un total de 576.

Las estaciones seleccionadas están ubicadas dentro de un cuadrante que abarca Morelos y sus alrededores (vecindad con el Estado de México, Distrito Federal y Guerrero) para contar con mayor información de la zona y mejorar las interpolaciones.

Tabla 2.1. Estaciones meteorológicas consultadas

Estación	Nombre	Municipio	Estado	Latitud (N)	Longitud (W)	Altitud (msnm)
9022	Km.39.5 a Cuernavaca	Tlalpan	Distrito Federal	-99.17	19.13	2990
9032	Milpa alta	Milpa Alta	Distrito Federal	-99.02	19.19	2420
12093	P. Valerio Trujano	Trujano	Guerrero	-99.48	18.30	842
12116	Iguala	Iguala	Guerrero	-99.55	18.35	730
15094	San Luis Ameca	Tenango del aire	México	-99.53	19.05	2400
17001	Atlatlahuacan	Atlatlahuacan	Morelos	-98.92	18.93	1630
17004	Cuernavaca	Cuernavaca	Morelos	-99.08	18.83	1653
17005	Cuatla	Cuatla	Morelos	-98.95	18.82	1320
17006	El rodeo	Miacatlán	Morelos	-99.33	18.77	1127
17007	Huajintlan	Amacuzac	Morelos	-99.42	18.62	920
17008	Huautla	Tlaquiltenango	Morelos	-99.02	18.43	930
17013	Temilpa	Tlaltizapán	Morelos	-99.10	18.70	960
17014	Temixco	Temixco	Morelos	-99.23	18.85	1280
17015	Tepalcingo	Tepalcingo	Morelos	-98.85	18.60	1420
17016	Tequesquitengo	Jojutla	Morelos	-99.25	18.60	950
17018	Ticuman	Tlaltizapán	Morelos	-99.12	18.77	965
17019	Tilzapotla	Puente de Ixtla	Morelos	-99.27	18.48	1000
17020	Tlacotepec	Zacualpan de Amilpas	Morelos	-98.75	18.82	1740
17021	Tlacualera	Ayala	Morelos	-98.93	19.03	2605
17022	Tres cumbres	Huitzilac	Morelos	-99.23	19.07	2810
17024	Yautepec	Yautepec	Morelos	-99.07	18.88	1215
17026	Zacatepec	Zacatepec de Hidalgo	Morelos	-99.18	18.65	920
17031	Jojutla	Jojutla	Morelos	-99.18	18.62	890
17033	Xicatlacotla	Tlaquiltenango	Morelos	-99.18	18.52	820
17036	Lagunillas de Rayón	Axochiapan	Morelos	-98.70	18.47	1100
17038	Nexpa	Tlaquiltenango	Morelos	-99.13	18.52	1200
17043	E.T.a. 118	Yecapixtla	Morelos	-98.87	18.88	1587
17047	Huitzilac	Huitzilac	Morelos	-99.27	19.03	2550

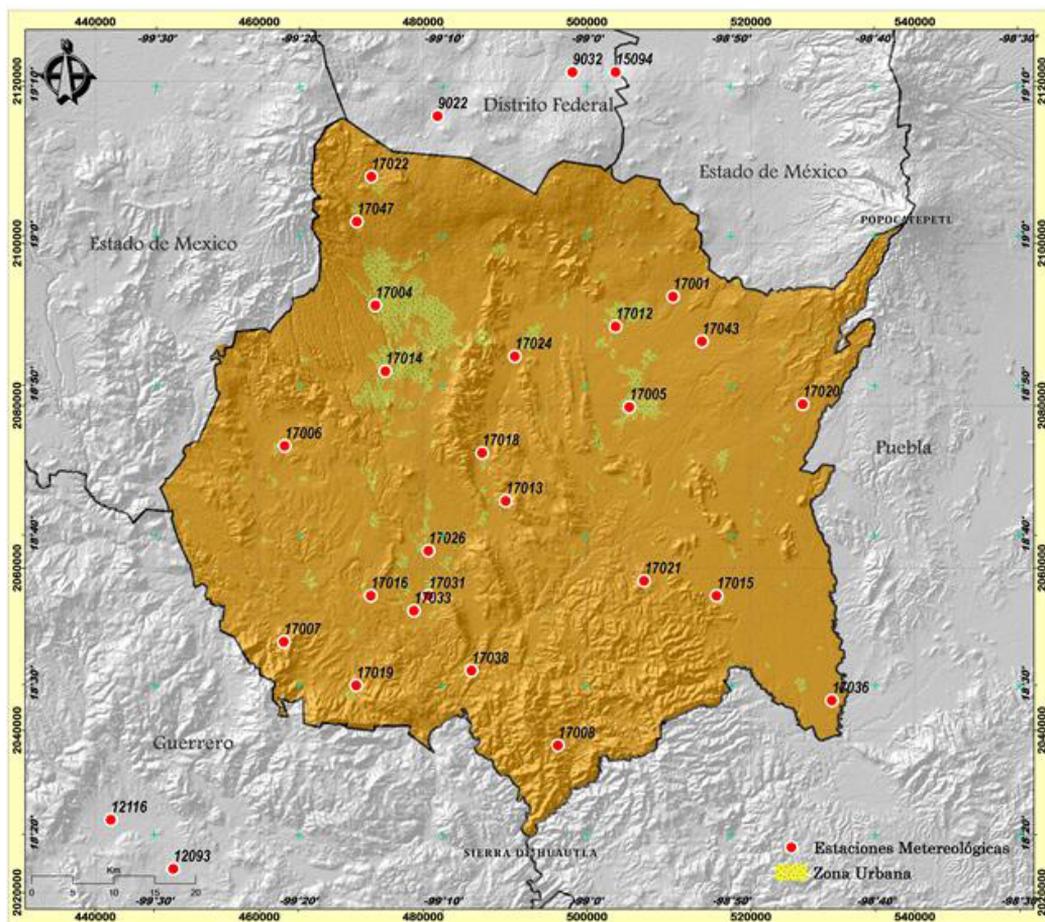


Figura 2.1. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el área de estudio

Cálculo de índices climáticos extremos

De las series de datos (temperatura media, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) se calcularon los promedios de 30 años de registros (1961-1990); a estos registros se les hicieron análisis de tendencias y anomalías anuales. Para ello se utilizaron algunos de los índices recomendados por el Grupo de Expertos para la Detección del Cambio Climático y el Seguimiento de Índices (The Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices, ETCCDMI). Los índices fueron calculados teniendo como período base 1961-1990. Los índices mensuales fueron calculados si no faltaban más de tres días en el mes, mientras que los anuales se calcularon si no faltaban más de quince días en el año (ETCCDMI, 2011).

Escenarios climáticos

Los escenarios climáticos que se presentan en este informe son un ensamble de 24 Modelos de Circulación Global (MCG) que consideran los escenarios de emisiones de GEI A2, A1B, B1 y Committed (SEMARNAT-INE, 2010). A partir de los escenarios regionalizados de cambio climático (temperatura y precipitación) se integraron las proyecciones considerando períodos de treinta años, con lo cual se obtuvieron tres climatologías: a) 2020s (representa el período 2010-2039); b) 2050s (representa el período 2040-2069), y c) 2080s (representa el período 2070-2099). El año que se tomó como referencia fue el de 1990.

Se generaron los mapas de temperatura y precipitación, a través de los cuales se obtuvieron los valores mínimo y máximo de los píxeles que cubren al estado para calcular el promedio. Por la resolución del modelo (50 km), Morelos queda cubierto por seis píxeles (en su mayor parte por dos de ellos). Con los valores promediados se obtuvieron los valores de anomalía y dispersión para temperatura y precipitación, para los escenarios A2 y A1B en cada climatología. Se calculó también el rango de cambio para cada una de las variables.

Los escenarios A2 y A1B se pueden definir de la siguiente manera:

A2: Emisiones Altas. Existe crecimiento constante de la población, el desarrollo económico está regionalmente orientado y el cambio tecnológico es muy fragmentado y más lento que en otros escenarios.

A1B: Emisiones Media-Alta. Rápido crecimiento económico regional con la introducción de tecnologías nuevas y eficientes. Existe un balance entre el uso de fuentes de energía fósil y no fósil.

Regionalización de escenarios climáticos

Los escenarios obtenidos a partir de los modelos de circulación global conservan el carácter de gran escala por la proveniencia y tipo de información que los generó. Tratándose de modelos globales con resoluciones de la escala de 2.5 a 1 grados geográficos (aprox. 100 km) es necesario contar con una metodología para llevar a puntos geográficos específicos el valor más probable de los modelos mencionados. En este sentido, el concepto de regionalización en el presente estudio consiste en estimar los valores más probables de las variables climáticas en un lugar determinado, considerando la historia climática local del sitio en cuestión.

Con el objetivo de cuantificar impactos relacionados a variaciones climáticas, se generaron series climáticas de futuros potenciales para las estaciones meteorológicas de

la zona de estudio, afectando las estadísticas que describen el clima local con los cambios derivados de los modelos globales.

La estrategia que se siguió, a fin de regionalizar los datos producidos por el MCG, consistió en la utilización de un Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico (GETM): el LARS-WG, herramienta que permite la simulación de los datos del tiempo en un sitio en particular bajo condiciones actuales y futuras del clima. Estos datos se producen en la forma de series de tiempo diario para un conjunto de variables del clima (precipitación, temperatura máxima, mínima y radiación solar) (Semenov *et al.*, 1999). Para este estudio, los datos observados de las variables meteorológicas fueron obtenidos de las 28 estaciones meteorológicas, en el período 1961-2008. Con la aplicación del LARS-WG a estas series, se generaron los archivos de parámetros que corresponden a una descripción estadística de las características del clima en cada punto de medición.

Los datos tomados corresponden a las proyecciones basadas en los escenarios A2 y A1B, así como para las climatologías 2020, 2050 y 2080, para cada uno de los seis pixeles correspondientes al estado de Morelos.

Finalmente, con estos datos se obtuvieron los valores extremos. Existen diversos índices para expresar la intensidad y variabilidad de eventos climáticos extremos. En el caso de las temperaturas, los índices de extremos utilizados fueron el percentil 90 de las temperaturas máximas diarias en el período cálido del año y el percentil 10 de las mínimas diarias en el período frío, considerando los años analizados; en el caso de la precipitación se utilizó el percentil 90 en el período de lluvias. Por último se elaboraron en ARCGIS® los mapas de percentiles de temperatura mínima, máxima y precipitación para diferentes períodos del año en el estado de Morelos.

Caracterización climática del estado de Morelos

Temperatura

En Morelos, durante el primer período de calentamiento anual, la insolación es elevada, incrementando notablemente los valores de temperatura; durante el verano la nubosidad es alta, por lo que las temperaturas tienden a atenuarse por la presencia de la nubosidad y la precipitación (Figura 2.2). En este sentido, la combinación de altitud, latitud y topografía dan como resultado el establecimiento de varias zonas térmicas. Una fría y muy fría coincidente con la parte más alta del estado ubicada hacia el norte en la región del volcán Popocatepetl. Una zona templada, con temperaturas medias anuales comprendidas entre 12° y 18°C, y la del mes más frío entre 3° y 18°C; estas condiciones existen en la porción situada paralelamente por debajo de las anteriores,

caracterizando localidades como Apapasco, Tres Cumbres, Huecahuasco, Huitzilac, Tetela del Volcán y Tlacualera, entre otras (Figura 2.3).

Las zonas semicálida y cálida se ubican al sur de la templada, y constituyen más del 70% del territorio del estado. Son típicas de estas zonas las temperaturas medias anuales entre los 18° y los 22°C en el caso de la semicálida que incluye localidades como Cuernavaca, Tlayacapan, Oaxtepec, Yecapixtla y Palpan. En la zona cálida las temperaturas medias anuales oscilan entre los 22° y los 26°C, incluso superior a los 26°C en algunas zonas (Figura 2.3).

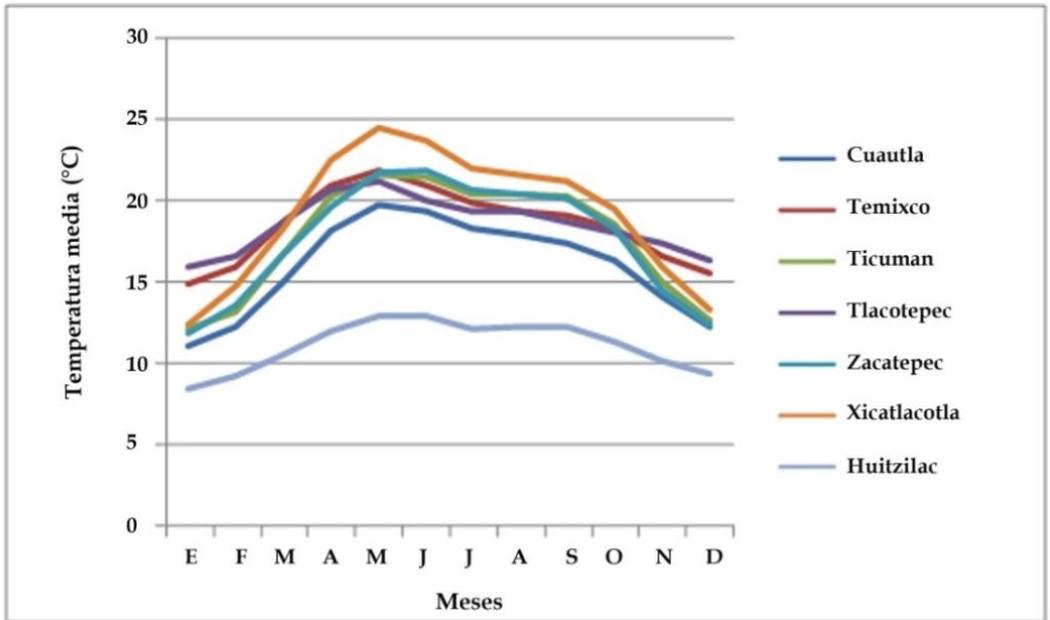


Figura 2.2. Marcha anual de la temperatura media anual del aire en algunas estaciones seleccionadas. Período 1961-1990.

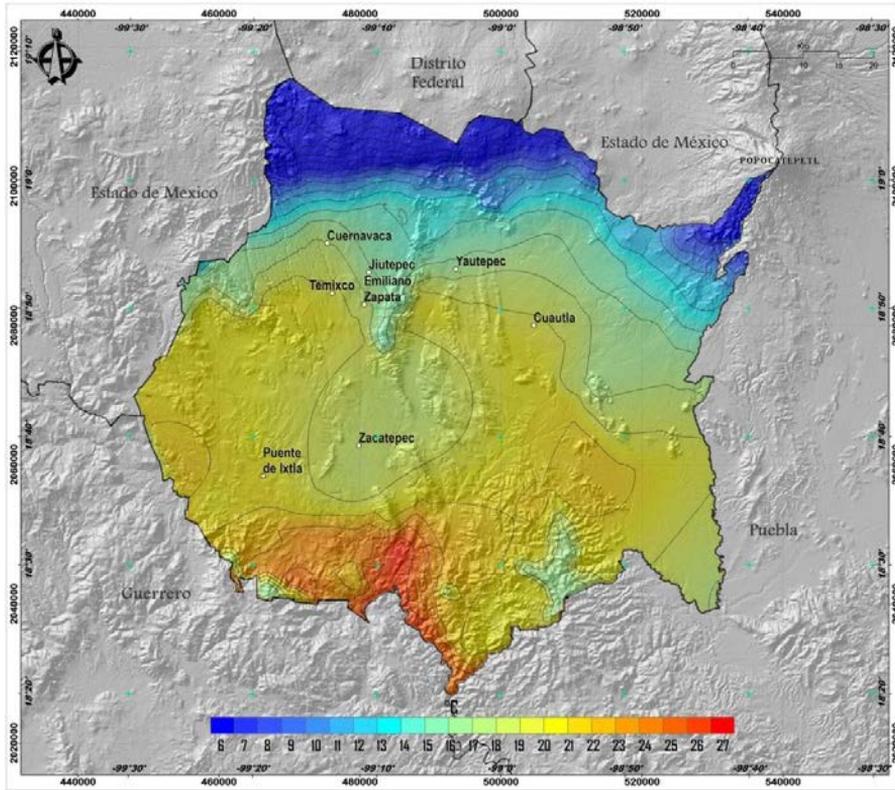


Figura 2.3. Temperatura media anual del aire en el estado de Morelos. Período 1961-1990.

En la entidad, la mayor parte de las estaciones reportan al mes de enero como el más frío. Los valores más bajos son del orden de 7.8° y 9.9°C, registrados en Tres Cumbres y Huitzilac, respectivamente; en tanto que los más altos son del orden de 22.8° y 24.8°C, registrados en Huautla y Tlaxiapotla, respectivamente; en el resto de la entidad se registran valores intermedios entre los ya mencionados, siguiendo un patrón de distribución similar a las descritas para las isoterma anuales.

Por su parte, los meses de abril y mayo registran las temperaturas medias mensuales más altas, respondiendo al equinoccio de primavera y primer paso del sol por el cenit del lugar; en tanto que durante el mes de junio, se empieza a marcar una ligera disminución de éstas debido a la presencia de precipitaciones. Las temperaturas ascienden ligeramente durante el mes de septiembre, época del segundo paso del sol por el cenit y equinoccio de otoño, y posteriormente disminuyen considerablemente

durante el invierno. Los valores de temperaturas en el mes de mayo, oscilan entre los 12.7° y los 14°C en Tres Cumbres y Huitzilac, y hasta los 29.1° y 30.7°C en Xicatlacotla y Tilzapotla, respectivamente.

En el estado, la ubicación de las barreras montañosas muestra una importante influencia en la distribución de las temperaturas máximas, presentando un gradiente de oscilación similar al descrito anteriormente. Así, localidades frías como Tres Cumbres, Huitzilac y Tlacualera registran promedios de temperatura máxima del orden de 17.3°, 18.1° y 19°C, respectivamente; mientras que los promedios más altos para esta misma variable en localidades calientes como Nexpa, Huantintlan y Tilzapotla, son de 34.3°, 34.6°, y 35.6°C, respectivamente.

El comportamiento de las temperaturas mínimas se corresponden con las descritas anteriormente, registrándose los valores más bajos hacia la porción montañosa del Norte, particularmente en Tres Cumbres con 3.3°C y Huitzilac con 6.4°C, en tanto que localidades como Huautla, Puente de Ixtla y Tilzapotla registraron valores mínimos promedio de 7.4°, 18.5° y 19.0°C, respectivamente.

Precipitación

Al igual que en una amplia superficie del país, en Morelos la distribución de la lluvia es modal o bimodal y su ocurrencia es en verano, iniciando generalmente a mediados de mayo y terminando en la primera quincena de octubre (concentrándose en esta temporada el 95% de la precipitación total anual). Durante esta época, los vientos alisios del hemisferio norte pasan por el Golfo de México, en donde recogen humedad, que depositan posteriormente en forma de lluvias abundantes (Figura 2.4). En la mayor parte de la entidad el mes más lluvioso es junio, seguido de los meses de julio, agosto y septiembre. Estos son los meses de mayor variabilidad interanual y en los que se presentan los eventos lluviosos más importantes.

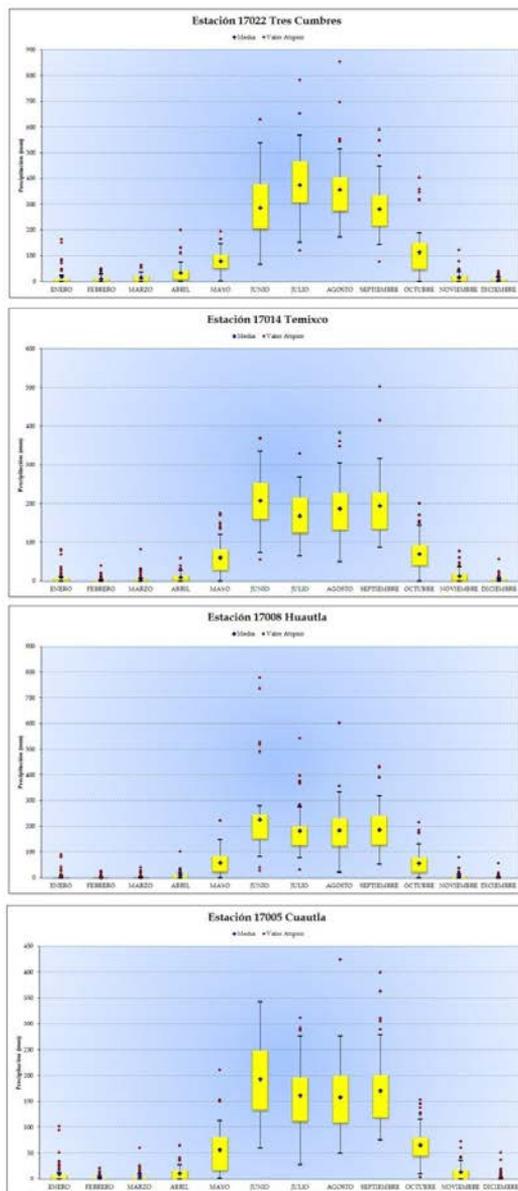


Figura 2.4. Comportamiento mensual de las precipitaciones en algunas estaciones seleccionadas. Período 1961-1990.

Durante el invierno, los patrones de circulación cambian en la zona y comienzan a dominar vientos del norte con componente del oeste, disminuyendo así la humedad en el aire por la entrada de masas de aire frío y seco de origen continental, lo que, se traduce en una disminución significativa de las precipitaciones entre los meses de noviembre y abril. Diciembre es el mes más seco en toda la entidad, seguido de febrero y ocasionalmente marzo, recibiendo como promedio, cinco mm de precipitación, por lo que la lluvia que se concentra en los meses invernales (diciembre a marzo) es menor al 5% total anual.

En la entidad, como se dijo anteriormente, la influencia orográfica juega un papel primordial en la distribución de la precipitación total anual, estableciéndose una relación directamente proporcional entre la altitud y la cantidad de precipitación recibida. En este sentido, los valores más altos se registran en las estribaciones elevadas de la Sierra del Chichinautzin y en los límites superiores de Huitzilac y Lagunas de Zempoala, así como en las faldas del volcán Popocatepetl, donde se reciben precipitaciones anuales superiores a los 1500 mm (Figura 2.5).

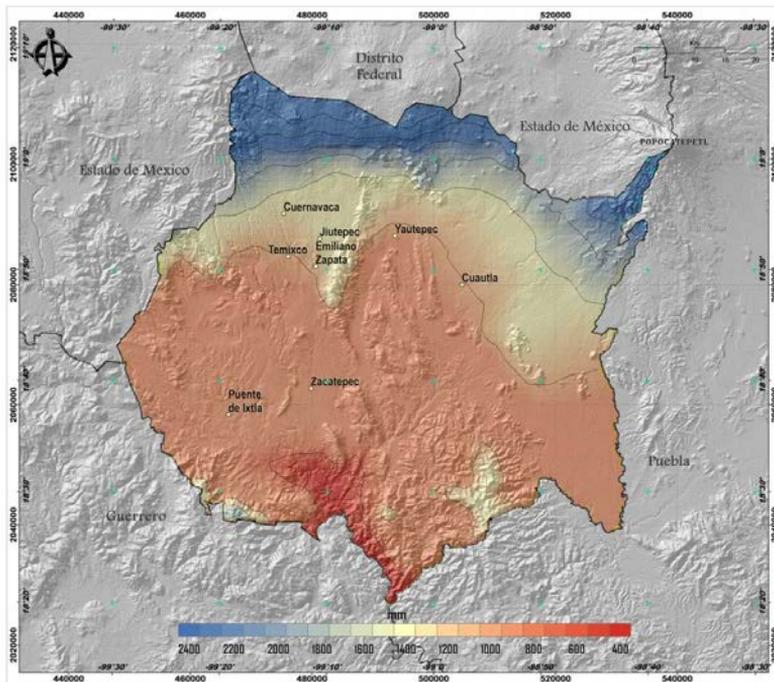


Figura 2.5. Distribución anual de las precipitaciones en el estado de Morelos. Período 1961-1990.

Localidades como Cuernavaca, Tepoztlán, Tlayacapan, Tlalnepantla, Totolapan, Achichipico, Ocuituco, Tetela del Volcán, Hueyapan y Tlacotepec, entre otras, se caracterizan por presentar precipitaciones anuales de entre 1000 y 1500 mm. Finalmente, lo que puede considerarse como la región del valle intermontano y la zona montañosa del sur (aproximadamente el 80% de la entidad) registra precipitaciones anuales menores a los 1000 mm.

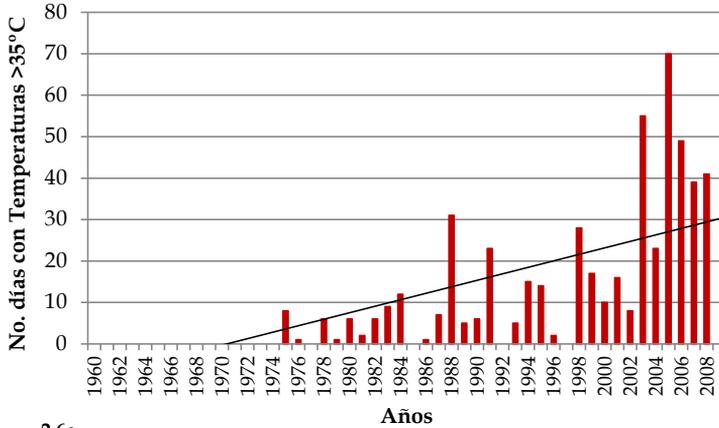
Variabilidad climática en el estado de Morelos

El Cuarto Informe del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2007) plantea que existen variaciones en el comportamiento de los elementos climáticos a escala global no registrados nunca antes. La tendencia de la temperatura media global en superficie en el período 1906-2005 es la de aumentar 0.74°C, oscilando entre 0.56-0.92°C. De los doce años comprendidos entre 1995 y 2006, once figuran entre los más cálidos desde 1850. La oscilación diaria de la temperatura o Rango Diario de Temperatura (RDT) ha disminuido, a cuenta de un aumento más rápido de la temperatura mínima del aire.

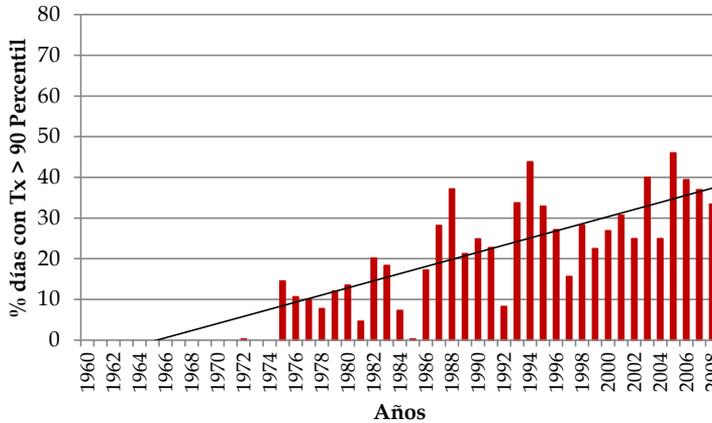
En cuanto a la precipitación, se plantea que entre 1900 y 2005, ésta aumentó notablemente en las partes orientales del norte de América del Sur y del Norte, Europa Septentrional y Central, aunque disminuyó en el Sahel, en el Mediterráneo, en el sur de África y en ciertas partes del sur de Asia.

El análisis de las series de datos climáticos para el estado de Morelos se realizó teniendo en cuenta el período 1961-2008, donde se pudo evidenciar una tendencia al aumento de la temperatura máxima del aire; representado este hecho en el aumento de los días calurosos ($T_x > 35^\circ\text{C}$) y el porcentaje de días con temperaturas máximas por encima del 90 percentil (Figura 2.6a). El aumento de días cálidos en la zona también se evidencia a través del aumento en las últimas décadas de los períodos con temperaturas altas, evidenciado en el índice WSDI que representa el número de veces en el año en que la temperatura máxima sobrepasa el 90 percentil al menos por seis días consecutivos (Figura 2.6b). Este aumento es notable en todas las zonas climáticas del estado, pero se evidencia en mayor medida en las zonas semicálidas y cálidas. Desde el punto de vista temporal, la década del 90 fue la que más influyó en dicho aumento.

En los casos de Cuautla y Cuernavaca quizás pudiera estar incidiendo el hecho de que estas localidades han experimentado un proceso creciente de urbanización en los últimos 40 años, lo que conlleva a un correspondiente aumento de la temperatura del aire, dado por el efecto de la isla de calor. No obstante, se necesita de estudios más precisos para determinar la verdadera influencia del proceso de crecimiento de estos centros urbanos en los aumentos de temperatura registrados en las dos últimas décadas.



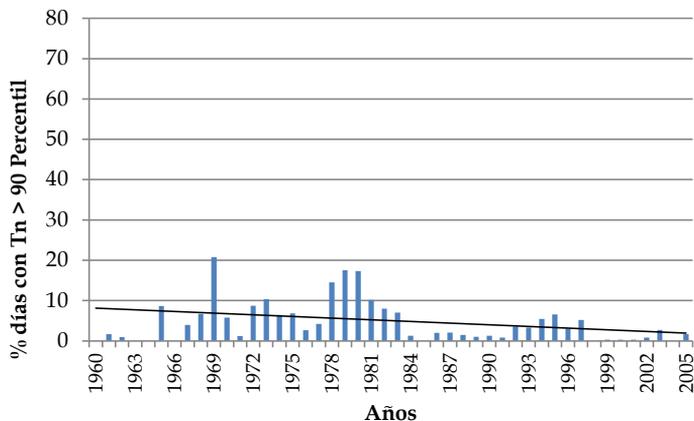
2.6a



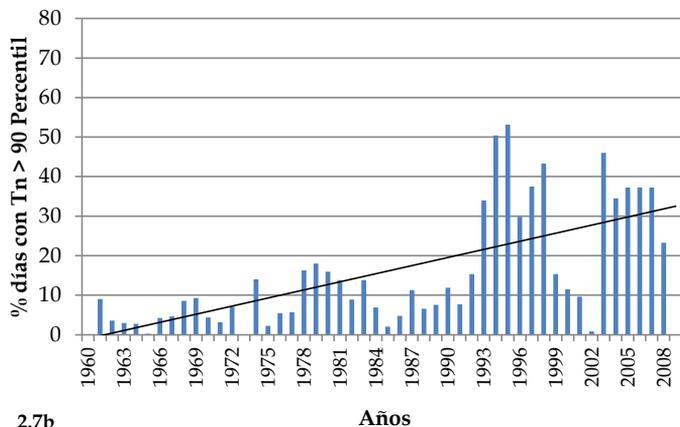
2.6b

Figura 2.6a. Tendencia del número de días calurosos en Cuautla. **2.6b.** Tendencia del porcentaje (%) de días al año con temperaturas máximas por encima del 90 percentil en Cuautla (1961-2008).

En el caso de las temperaturas mínimas, la tendencia al aumento no es tan generalizada en todo el estado; no obstante, en varias estaciones (Cuautla, Ticuman, Tlacotepec, Cuernavaca y Valerio Trujano) se obtuvieron tendencias positivas en el número de días con temperaturas por encima de los 20°C (TR20) y con temperaturas mínimas por encima del 90 percentil (TN90) (Figura 2.7a y 2.7b).



2.7a



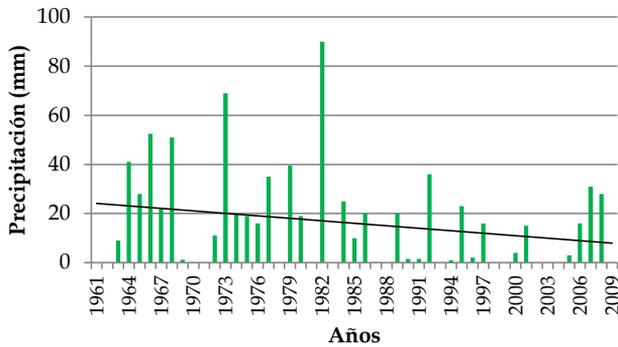
2.7b

Figura 2.7a. Tendencia del porcentaje (%) de días con temperaturas mínimas por encima del 90 percentil en Temixco. **2.7b.** Tendencia del porcentaje (%) de días con temperaturas mínimas por encima del 90 percentil en Ticuman (1961-2008).

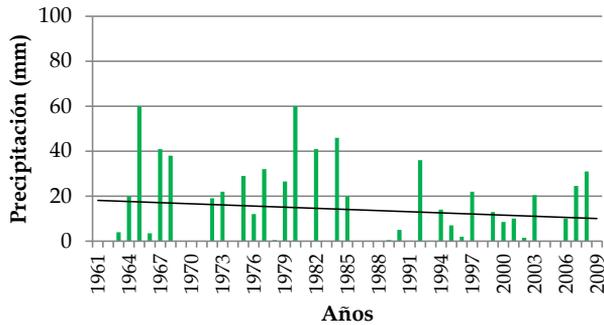
En cuanto a las precipitaciones, se ha evidenciado en las últimas décadas que en la mayor parte de México existe una tendencia a mayor precipitación, principalmente en los estados del Norte. Por el contrario, en los estados donde las lluvias dependen de lo que ocurre en el Pacífico mexicano (huracanes, actividad de la Zona Intertropical de Convergencia), parece haber una tendencia a menos precipitaciones (Magaña *et al.*, 2004).

Las estaciones meteorológicas estudiadas en el estado de Morelos mostraron, en su mayoría, un aumento de los acumulados de precipitaciones anuales (PRCPTOT), así como un aumento de las precipitaciones extremas representadas por los acumulados máximos registrados en 24 horas (Rx1day), en cinco días consecutivos (Rx5day) y en los días húmedos y extremadamente húmedos (R95p y R99p).

En cuanto al comienzo de la estación lluviosa se pudo observar, en análisis realizados de los acumulados decenales, que en algunas estaciones (Temixco, Cuautla, Ticuman y Zacatepec) ha habido una disminución de los acumulados en la segunda y tercera decena de mayo cuando normalmente debe comenzar esta estación y un aumento de los acumulados en la primera decena del mes de junio (Figura 2.8a y 2.8b). Este comportamiento pudiera ser un indicador del corrimiento del comienzo de la estación lluviosa en la región.



2.8a



2.8b

Figura 2.8a. Tendencia de los acumulados de precipitación en la segunda decena de mayo en Cuautla. **2.8b.** Tendencia de los acumulados de precipitación en la segunda decena de mayo en Temixco (1961-2008).

En este sentido, en un estudio sobre la variabilidad de los regímenes de lluvia en Morelos, se reporta un desfase en el inicio y término de las temporadas de lluvia en diferentes localidades (Bologaro *et al.*, 2012; enviado). En dicho escrito se reporta que, para Cuernavaca, el inicio de la estación lluviosa se retrasó un día y el final de la misma se retrasó seis días; para Huautla, el inicio se adelantó dos días y el final se retrasó 17 días, es decir, el cambio en la duración de la temporada lluviosa en Huautla es de 19 días; para el caso de Cuautla, el inicio se retrasó doce días y el final de la estación se retrasó aproximadamente tres días; y para el caso de Huitzilac, el inicio de la lluvia se retrasó dos días y el final se retrasó cinco días (Tabla 2.2).

Con respecto al cambio observado en la precipitación total (Tabla 2.2), se aprecia una variabilidad en las distintas localidades del estado, que va desde una disminución de 242.57 mm en Huautla hasta un aumento de 316.88 mm en Huitzilac, esto debido a las características particulares de cada región.

Tabla 2.2. Variabilidad de la temporada de lluvias (período 1961-2008). Los valores negativos de (Δi) y/o (Δf) indican un adelanto en el inicio o término de la temporada de lluvias. Los valores positivos de (Δi) y/o (Δf) indican un atraso en el inicio o término de la temporada de lluvias.

Nombre	Clave	ΔP_T mm	ΔP_S mm	ΔD Días	ΔI mm/día	Δo días	Δd días
Temixco	17014	157.88	158.94	-4.45	1.36	1.28	-3.40
Cuautla	17005	-153.24	-137.37	-9.35	-0.71	12.35	3.03
Ticuman	17018	262.12	245.64	-3.12	1.97	0.76	-2.19
Tlacotepec	17020	82.75	119.45	7.71	0.47	3.00	10.79
Zacatepec	17026	56.6	57.85	-6.86	0.66	3.58	-3.25
Xicatlacotla	17033	84.21	98.09	18.23	0.07	-8.50	5.19
Cuernavaca	17004	229.67	227.90	5.90	1.25	0.55	6.06
Miacatlan	17006	271.31	224.51	-9.81	2.27	7.35	-2.40
Huautla	17008	-242.57	-204.63	19.47	-2.87	-2.38	17.09
Huitzilac	17047	316.88	275.87	8.87	1.43	2.03	4.96
Valerio Trujano	12093	-171.21	-116.16	-6.34	-1.59	1.77	-8.83

Simbología: Precipitación anual total (PT), Precipitación en temporada de lluvias (Pv), Duración de la temporada de lluvias (ΔD), Intensidad de la temporada de lluvias (ΔI). (Modificada de Bologaro *et al.*, 2012).

En la figura 2.9 y en la tabla 2.2 se muestra cómo se manifiesta la variabilidad de la lluvia en el estado, siendo que en la zona sur, el resultado del análisis de la serie de tiempo ha dado una disminución de la precipitación total, mientras que para la zona central y la norte, el cambio en la precipitación total marca un aumento, siendo mayor en estaciones como Cuernavaca y Huitzilac.

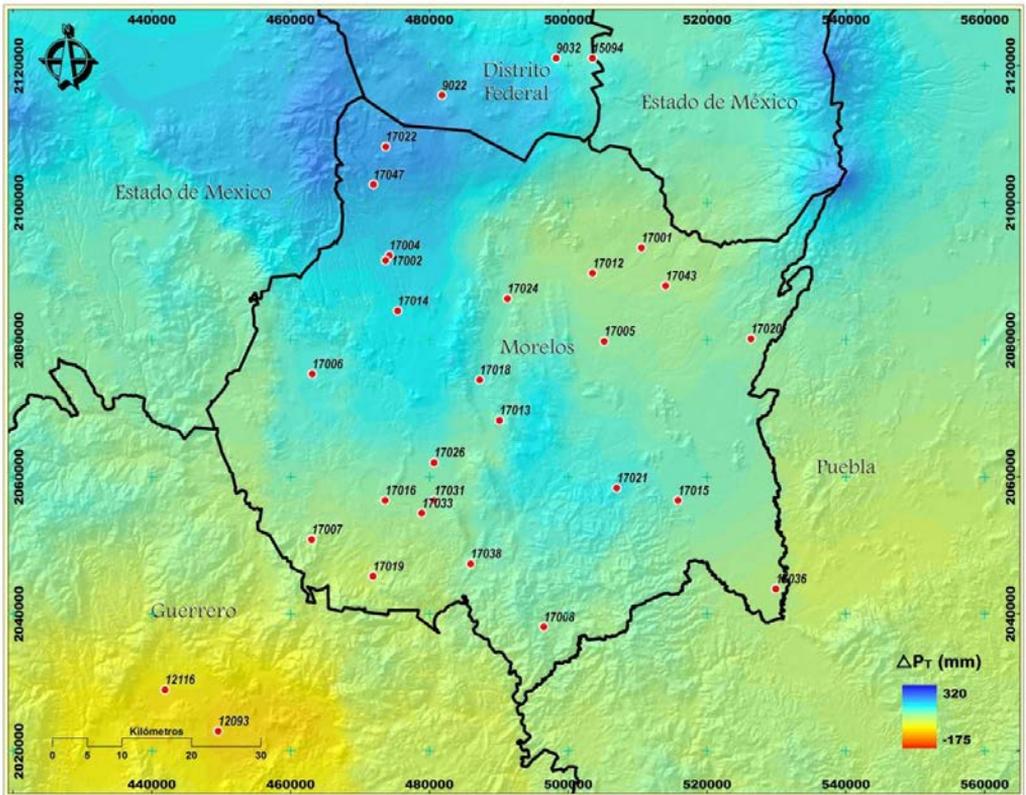


Figura 2.9. Variabilidad de la precipitación total en el estado de Morelos

Escenarios climáticos

Proyectar el futuro en cualquier aspecto de la vida tiene, en mayor o menor grado, una cierta incertidumbre asociada. En el caso del cambio climático, por ejemplo, prácticamente no hay duda de que el mundo experimentará temperaturas más elevadas y un ciclo hidrológico más intenso y cambiante (IPCC, 2007); sin embargo, aún es materia de estudio la magnitud de tales cambios o los impactos específicos que una región experimentará, pues ello depende de factores tanto físicos como socioeconómicos. Es por esto que al generar escenarios del clima futuro se tienen que considerar modelos integrados que contemplen tanto la generación futura de gases de efecto invernadero, producto del desarrollo socioeconómico global, como la respuesta del clima del planeta al forzamiento radiativo resultante. El IPCC ha proyectado diversos escenarios de emisiones y concentraciones de gases de efecto invernadero para

estimar los cambios en el clima del planeta, sus repercusiones y las opciones para mitigar dicho cambio.

A esta serie de escenarios de emisiones se les conoce como Informes Especiales sobre Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés) y se basan en diversas hipótesis sobre el desarrollo socioeconómico del planeta. Cada escenario representa una interpretación cuantitativa específica y están divididas en cuatro líneas evolutivas denominadas familias (A1, A2, B1 y B2). Las familias de escenarios divergen cualitativa y cuantitativamente. Las dos familias "A", por ejemplo, sitúan un alto crecimiento económico, mientras que las dos familias "B" exploran las consecuencias de un crecimiento económico más bajo. Las familias "A1" y "B1" están orientadas hacia la convergencia global, mientras que las familias "A2" y "B2" (Figura 2.10) se enfocan en las estructuras regionales (Conde y Gay, 2008).

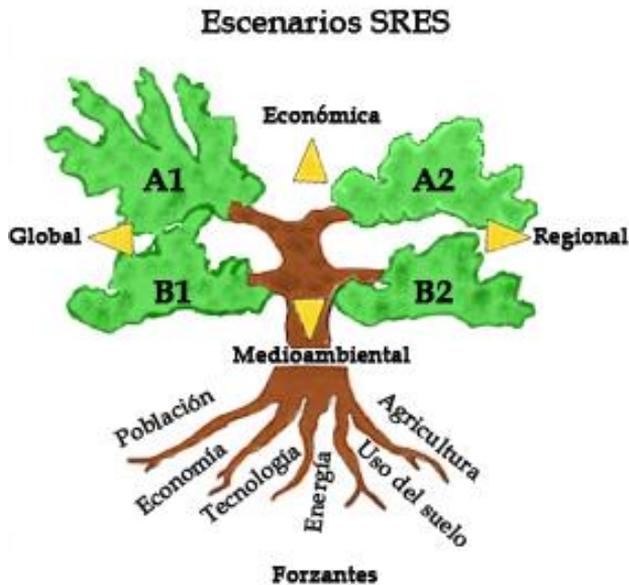


Figura 2.10. Esquema de Escenarios de Emisiones según el Reporte Especial (SRES) para el IPCC. Se indican los forzantes que determinarán los posibles futuros económicos y medioambientales. **Fuente:** Guía para la Generación de Escenarios de cambio Climático a Escala Regional Primera versión. Noviembre, 2008, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

Para el caso del estado de Morelos, se consideraron los escenarios A1B y el A2. El A1B es un escenario que considera un esfuerzo de la sociedad en cuanto a mitigación, buscando un equilibrio entre todas las fuentes de energía utilizadas, y el escenario A2 es un escenario más tendencial, en donde se considera un alto crecimiento económico con una orientación principalmente regional.

México, por su ubicación geográfica, topografía y aspectos socioeconómicos, es especialmente vulnerable a los impactos de la variabilidad climática y al cambio climático (SEMARNAT-INE, 2006). Con base en resultados de los escenarios climáticos generados con Modelos de Circulación General (MCG) bajo los escenarios de emisión A2 y B2, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Es muy probable que el clima de México sea más cálido (2° a 4°C) para el 2020, 2050 y 2080, principalmente en el norte del país. Se espera que el clima alrededor del año 2020 sea entre 1.5 y 2.5°C más caliente que en la actualidad. Los aumentos en la temperatura reflejarán, por ejemplo, un incremento de olas de calor que llevarán con frecuencia a incrementos en las temperaturas máximas y el número de días considerados muy cálidos.
- Se proyectan disminuciones en la lluvia, así como cambios en su distribución temporal, con respecto al escenario base de 1961-1990; por ejemplo, se esperan reducciones de hasta 15% en regiones del centro y de menos del 5% en la vertiente del Golfo de México, principalmente entre enero y mayo.
- El ciclo hidrológico se volverá más intenso, por lo que aumentará el número de tormentas severas y la intensidad de los períodos de sequía.

En dicha comunicación también se plantea que los eventos extremos, como huracanes y frentes fríos (nortes), requieren consideración especial en el caso de las proyecciones de precipitación para México. Es posible que los nortes se vuelvan menos frecuentes y es incierto en qué medida dicha disminución podría afectar las precipitaciones, pero de acuerdo con ciertos escenarios, éstas tenderán a disminuir principalmente en la vertiente del Golfo de México.

En el caso de ciclones tropicales, se considera que en promedio aumentarán en intensidad, al ocurrir una disminución en la presión central media del sistema, de aproximadamente 14%, con aumentos del 6% en la intensidad de los vientos y un aumento en las precipitaciones, en aproximadamente 18%, en un radio de 100 km con respecto al centro del huracán. Tales cambios proyectados pueden ser difíciles de detectar en los datos actuales, ya que la incertidumbre que conlleva una muestra pequeña oscurece la señal frente a las grandes variaciones interanuales e interdecadales conocidas (SEMARNAT-INE, 2006).

Escenarios A1B y A2 de cambio en la temperatura media anual para el Estado de Morelos

El escenario climático A1B obtenido para el estado de Morelos muestra, de forma general, que es probable que la temperatura media anual aumente para el año 2020 entre 0.5° y 1.3°C; aumento que pudiera ser continuo hasta llegar a temperaturas de entre 1.9° y 3.3°C en el 2080. En cuanto a la confiabilidad de los modelos de temperatura puede observarse que la dispersión IQR es pequeña (de 0.4 a 0.7°C), por lo que la probabilidad de que estos modelos se cumplan es alta, mientras que el escenario A2 muestra que la anomalía de temperatura media podría incrementarse desde un mínimo de 0.5°C en 2020, hasta valores extremos de 3.8°C de incremento para el año 2080 (Tabla 2.3 y Figuras 2.11, 2.12 y 2.13), datos que coinciden con lo publicado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992).

Tabla 2.3. Escenarios A1B y A2 de cambio de temperatura media anual (°C) para 2020, 2050 y 2080 en el estado de Morelos

TEMPERATURA (°C)	ESCENARIO A1B			ESCENARIO A2		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Anomalía (TAS)	0.9	1.8	2.6	0.9	1.7	3
Dispersión (IQR)	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5	0.8
Rango de cambio (±)	0.5	1.2	1.9	0.5	1.2	2.2
	1.3	2.4	3.3	1.3	2.2	3.8

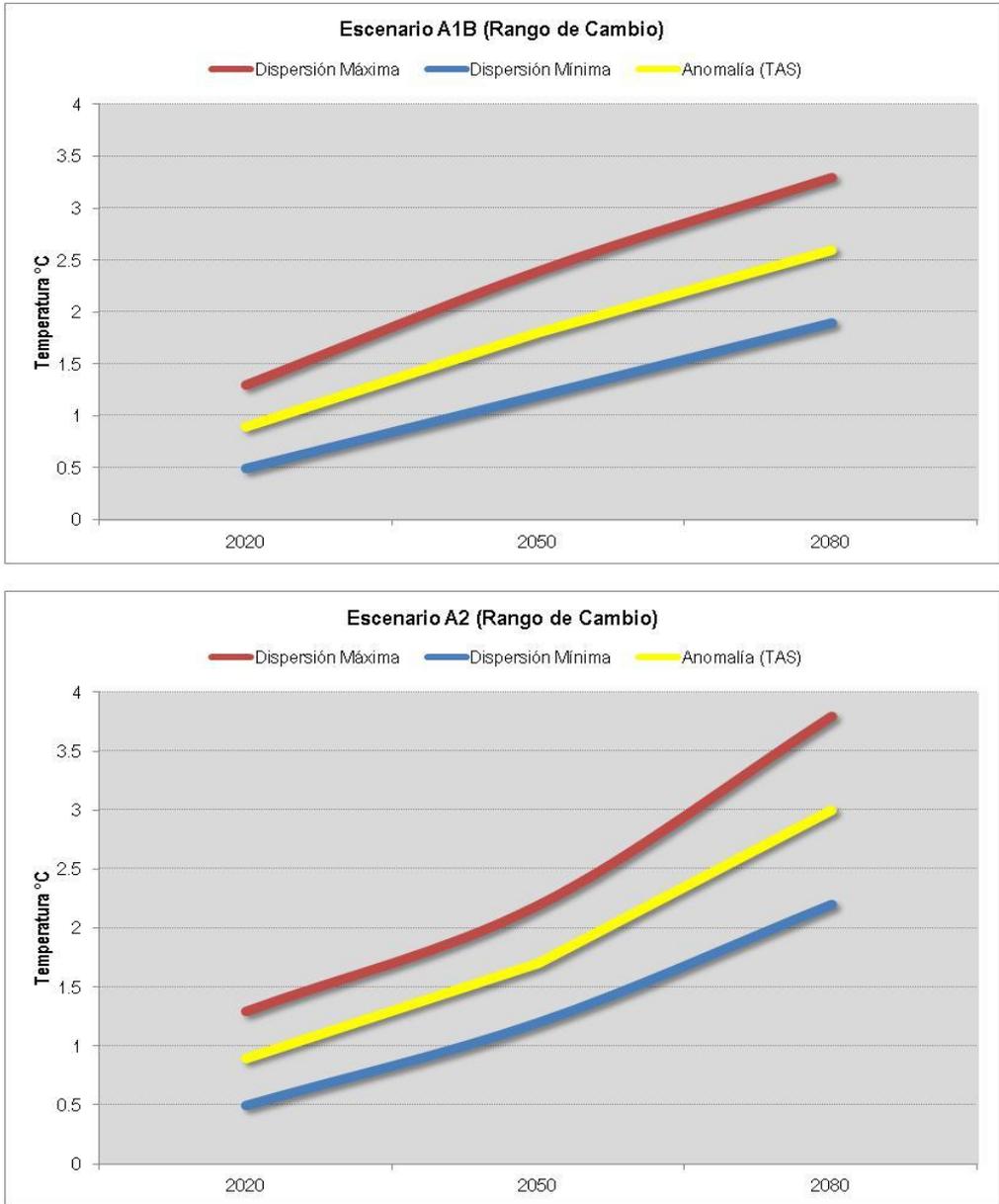


Figura 2.11. Rango de cambio en la temperatura media anual (°C) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B y A2 en el estado de Morelos.

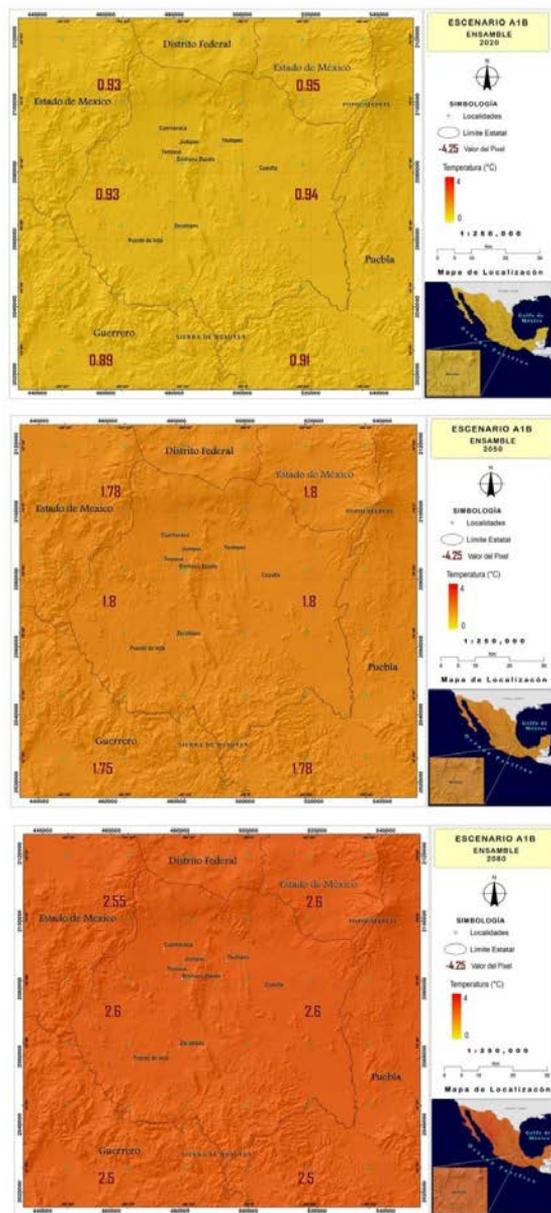


Figura 2.12. Escenarios de cambio en temperatura media anual (°C) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B. Los valores en los mapas corresponden al valor de la anomalía para el centro del píxel.

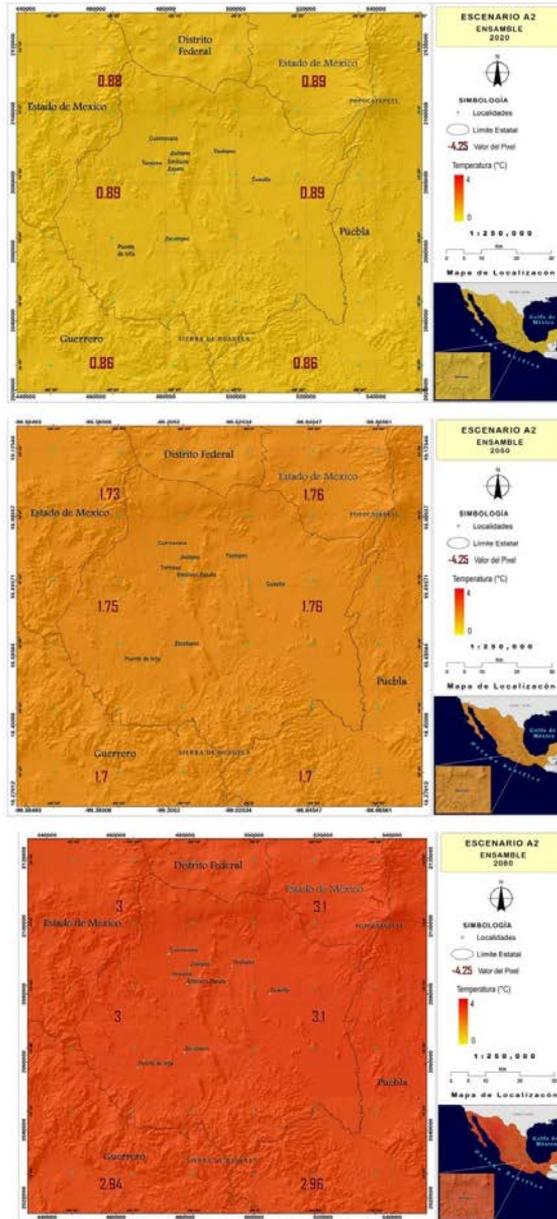


Figura 2.13. Escenarios de cambio temperatura media anual (°C) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A2. Los valores en los mapas corresponden al valor de la anomalía para el centro del pixel.

Escenarios A1B y A2 de cambio en el porcentaje (%) de precipitación para el estado de Morelos

El escenario de precipitación A1B estimado por el modelo muestra que la tendencia de la lluvia es a disminuir en un 3% en las siguientes décadas. Cuando se consideran las dispersiones de los modelos, éstas son relativamente altas con magnitudes de 11% y 12%. Considerando que la anomalía de precipitación es relativamente baja con respecto al valor de su dispersión, en el estado de Morelos pueden encontrarse escenarios donde la precipitación aumenta 9%, hasta escenarios donde la precipitación disminuye -15%. Para el caso del escenario A2, el cambio de la precipitación muestra una disminución, con valores de entre -5.6 a -8.8% en el periodo de 2020 a 2080. Si se consideran las dispersiones IPO de los modelos, el rango de cambio de la precipitación va desde 8 % hasta -15% en el caso del escenario A1B, y desde 3.2 % hasta -20.8% en el escenario A2, el cual es un rango muy amplio de variabilidad. Estos enormes rangos de variabilidad generan mayor incertidumbre en cuanto a la valoración de la vulnerabilidad de los sectores relacionados con el agua (Figuras 2.14 y 2.15). En la tabla 2.4 se presentan los valores de cambio en la precipitación anual (%) para 2020, 2050 y 2080 en el estado de Morelos.

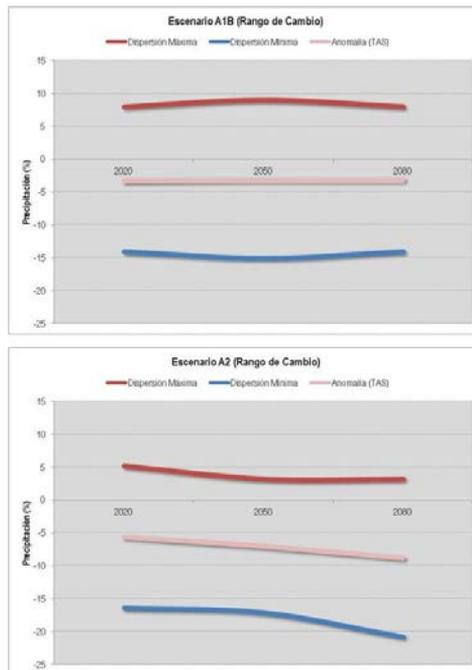


Figura 2.14. Rango de cambio de la precipitación anual (%) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B y A2 en el estado de Morelos

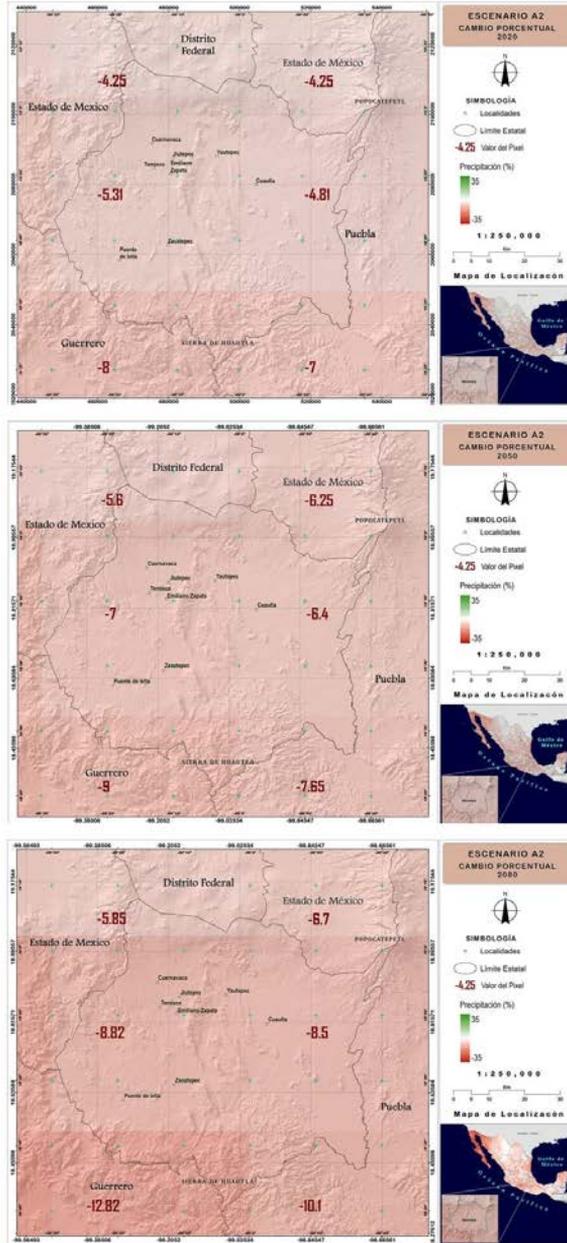


Figura 2.15. Escenarios de cambio en precipitación anual (%) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A2. Los valores en los mapas corresponden al valor de la anomalía para el centro del pixel.

Tabla 2.4. Escenarios A1B y A2 de cambio en la precipitación anual (%) para 2020, 2050 y 2080 en el estado de Morelos

PRECIPITACIÓN (%)	ESCENARIO A1B			ESCENARIO A2		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Anomalía (EPO)	-3.2	-3.1	-3.1	-5.6	-7	-8.8
Dispersión (IPO)	11	12	11	10.8	10.2	12
Rango de cambio (±)	-14	-15	-14	-16.4	-17.1	-20.8
	8	9	8	5.2	3.2	3.2

Regionalización de escenarios climáticos

A continuación se presentan los resultados de las salidas creadas por el Generador Estocástico de Tiempo Meteorológico LARS y la climatología base observada para algunas de las estaciones meteorológicas del estado, los cambios que se proyectan hacia las climatologías 2020, 2050 y 2080 con los escenarios A2 y A1B.

Escenarios A1B y A2 del cambio en las temperaturas máximas y mínimas en el estado de Morelos

La proyección del escenario A1B para los años 2020, 2050 y 2080 de acuerdo a los resultados del LARS en relación al percentil 10 de la temperatura mínima, muestra en general el mismo patrón en todas las estaciones estudiadas (Tabla 2.5, Figura 2.16), marcando un aumento de la temperatura mínima para el año 2080, es decir, los días fríos serán menos fríos debido al calentamiento global.

Los aumentos en la temperatura mínima son constantes en ambos escenarios (A1B y A2) de una climatología a otra (Tablas 2.5 y 2.6, Figura 2.17). De acuerdo con los resultados obtenidos, en la estación de Tres cumbres, al norte del estado, a 2810 m de altitud, se observan los mínimos aumentos en la temperatura mínima para los años 2020, 2050 y 2080. Mientras que para la estación Lagunillas del Rayón, ubicada en el suroriente del estado, a 1100 m de altitud, se observan los mayores aumentos en la temperatura mínima para los años 2020, 2050 y 2080 con 1.7°, 2.2° y 3°C respectivamente.

Como excepción, encontramos que en la Estación Km 39.5 a Cuernavaca, ubicada en la Sierra del Chichinautzin, lugar que se encuentra a casi 3000 msnm y que presenta las temperaturas más frías del cuadrante de estudio; en dicha estación se puede observar cómo la temperatura mínima se hará más extrema disminuyendo hasta 0.7°C en el año 2020.

Tabla 2.5. Percentiles 10 y 90 para las temperaturas (°C) mínima y máxima en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B.

ESCENARIO A1B		Percentil 10 de temperatura mínima (°C)				Percentil 90 de temperatura máxima (°C)			
CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	LÍNEA BASE	A1B 2020	A1B 2050	A1B 2080	LÍNEA BASE	A1B 2020	A1B 2050	A1B 2080
9022	Km 39.5 a Cuernavaca	2	1.3	1.7	2.2	21.5	21.9	22.8	23.8
9032	Milpa alta	5	5.8	6.3	6.8	25.5	26.9	27.8	28.7
12093	P. Valerio Trujano	14	14.9	15.5	16.1	37.5	38.2	39.1	39.9
12116	Iguala (DGE)	13.4	14.3	14.9	15.5	39	39.6	40.4	41.3
15094	San Luis Ameca	1	1.89	2.3	2.8	27	28.3	29.2	30.1
17001	Atlatlahuacan	8.5	9.3	9.9	10.5	31	32.8	33.7	34.6
17004	Cuernavaca (DGE)	12	12.7	13.3	13.9	30.5	31.6	32.4	33.3
17005	Cuautla (DGE)	9	9.9	10.4	11	33	34.3	35.2	36.1
17006	El rodeo	13	14	14.5	15.1	35	36.1	36.9	37.8
17007	Huajintlán	10.5	11.5	12.1	12.6	39.5	41.1	42.1	43
17008	Huautla	12.5	13.5	14.1	14.6	34.5	35.9	36.7	37.6
17013	Temilpa	10	10.7	11.2	11.8	37	38.3	39.2	40
17014	Temixco (DGE)	12	12.9	13.5	14.1	34.5	35.3	36.2	37
17015	Tepalcingo	8	9.3	9.9	10.4	35	36.4	37.3	38.2
17016	Tequesquitengo	11.5	12.7	13.3	13.9	37	37.6	38.5	39.3
17018	Ticuman	9	9.8	10.4	11	37	38.3	39.2	40.1
17019	Tilzapotla	14	14.6	15.2	15.8	39	40.4	41.3	42.2
17020	Tlacotepec	9	9.7	10.3	10.9	32	32.8	33.6	34.5
17021	Tlacualera (S. F. Neri)	4.5	5.19	5.7	6.3	24	24.5	25.4	26.3
17022	Tres Cumbres	-0.1	-0.1	0.3	0.9	21	22.2	23.1	24
17024	Yautepec	7.5	8.5	9.1	9.7	34.5	35.4	36.3	37.2
17026	Zacatepec	9	9.8	10.4	11	37	37.7	38.5	39.4
17031	Jojutla (SMN)	10	10.3	10.9	11.5	38	38.6	39.4	40.3
17033	Xicatlacotla (CFE)	10	11.4	12	12.6	38.5	39.3	40.2	41
17036	Lagunillas de Rayón	6	7.7	8.2	8.8	35	36.5	37.4	38.3
17038	Nexpa	11	11.7	12.2	12.8	39	39.8	40.7	41.6
17043	Yecapixtla E.T.A. 118	9	9.7	10.3	10.9	31.5	32.6	33.4	34.3
17047	Huitzilac (DGE)	2	3	3.5	4	22	23.1	24	24.9

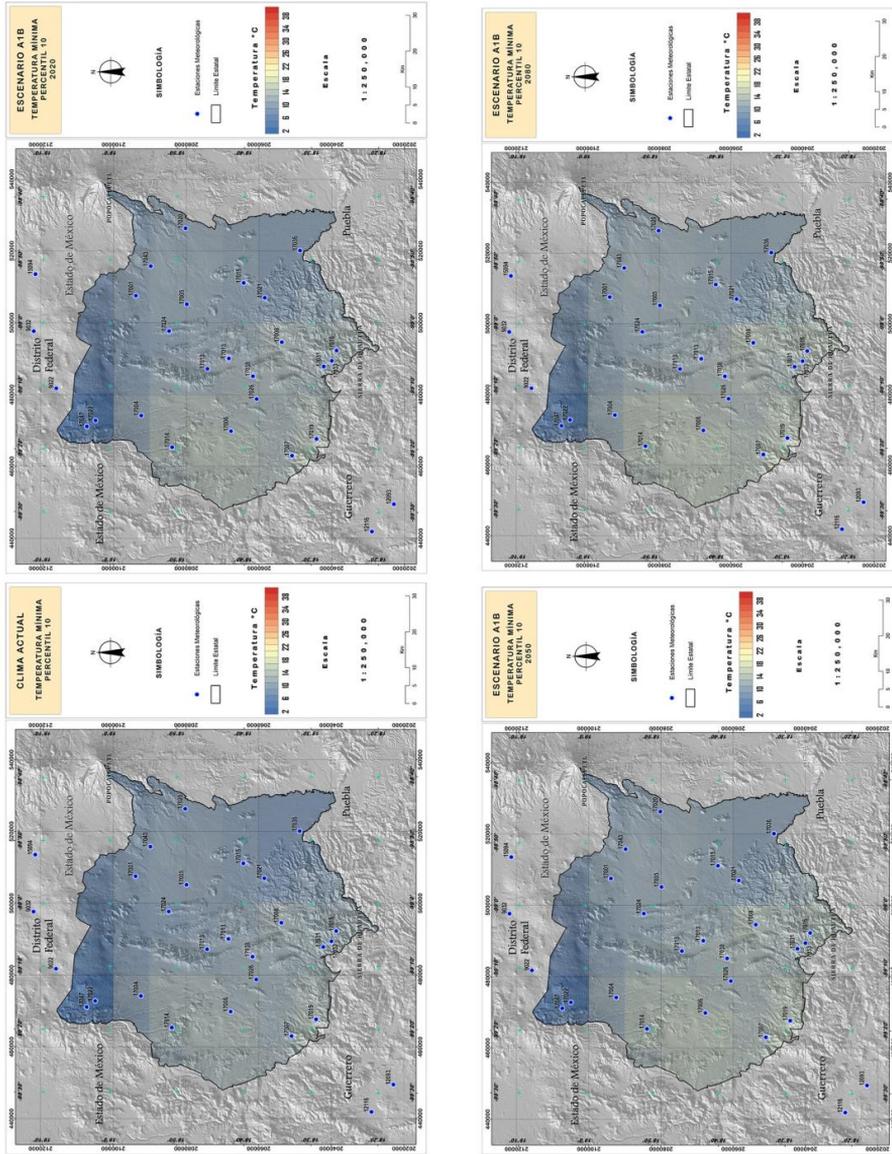


Figura 2.16. Escenarios de cambio en el percentil 10 para la temperatura mínima (°C) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B

Tabla 2.6. Percentiles 10 y 90 para las temperaturas (°C) mínima y máxima en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A2

ESCENARIO A2		Percentil 10 de temperatura mínima (°C)				Percentil 90 de temperatura máxima (°C)			
CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	LÍNEA BASE	A2 2020	A2 2050	A2 2080	LÍNEA BASE	A2 2020	A2 2050	A2 2080
9022	Km 39.5 Cuernavaca a	2	1.3	1.7	2.4	21.5	21.8	22.7	24.1
9032	Milpa alta	5	5.8	6.3	7.1	25.5	26.8	27.7	29
12093	P. Valerio Trujano	14	15	15.5	16.3	37.5	38.2	39	40.2
12116	Iguala (DGE)	13.4	14.4	14.9	15.8	39	39.6	40.3	41.6
15094	San Luis Ameca	1	1.8	2.3	3	27	28.2	29.1	30.5
17001	Atlatlahuacan	8.5	9.2	9.8	10.7	31	32.8	33.6	34.9
17004	Cuernavaca (DGE)	12	12.7	13.3	14.1	30.5	31.5	32.3	33.6
17005	Cuatla (DGE)	9	9.9	10.4	11.3	33	34.2	35	36.4
17006	El rodeo	13	14	14.5	15.4	35	36	36.8	38.2
17007	Huajintlán	10.5	11.5	12.1	12.9	39.5	41.1	41.9	43.3
17008	Huautla	12.5	13.5	14.1	14.8	34.5	35.8	36.6	37.9
17013	Temilpa	10	10.7	11.3	12.1	37	38.2	39	40.4
17014	Temixco (DGE)	12	12.9	13.5	14.3	34.5	35.21	36.1	37.4
17015	Tepalcingo	8	9.3	9.89	10.7	35	36.3	37.2	38.5
17016	Tequesquitengo	11.5	12.8	13.3	14.1	37	37.5	38.4	39.7
17018	Ticuman	9	9.9	10.4	11.2	37	38.3	39.1	40.4
17019	Tilzapotla	14	14.7	15.2	16	39	40.4	41.2	42.5
17020	Tlacotepec	9	9.7	10.3	11.1	32	32.7	33.5	34.8
17021	Tlacualera (S. F. Neri)	4.5	5.2	5.7	6.6	24	24.4	25.3	26.6
17022	Tres Cumbres	-0.1	-0.1	0.4	1.1	21	22.1	23	24.4
17024	Yautepec	7.5	8.5	9.1	9.9	34.5	35.4	36.2	37.5
17026	Zacatepec	9	9.9	10.4	11.2	37	37.6	38.4	39.8
17031	Jojutla (SMN)	10	10.4	10.9	11.8	38	38.5	39.3	40.6
17033	Xicatlacotla (CFE)	10	11.5	12	12.9	38.5	39.2	40	41.4
17036	Lagunillas de Rayon	6	7.7	8.2	9	35	36.4	37.2	38.6
17038	Nexpa	11	11.7	12.2	13	39	39.7	40.6	41.9
17043	Yecapixtla E.T.A. 118	9	9.8	10.3	11.2	31.5	32.5	33.3	34.6
17047	Huitzilac (DGE)	2	3	3.5	4.2	22	23.1	23.9	25.3

Con respecto a la temperatura máxima, ésta variará de 0.4° a 3.9°C. El valor máximo corresponde a la estación Huajintlán con datos de hasta 43.3°C para el año 2080. En la estación Tlacualera ubicada en la zona suroriente del estado con 2605 m de altitud, se observan las mínimas variaciones en la temperatura máxima que van desde 0.4° hasta 2.6°C, mientras que en la estación de Atlatlahucan, a 1630 m de altitud, se observan los mayores aumentos en la temperatura máxima, que van desde 1.8° en el año 2020 hasta 3.9°C en el año 2080 (Tabla 2.5 y Figuras 2.17 y 2.18).

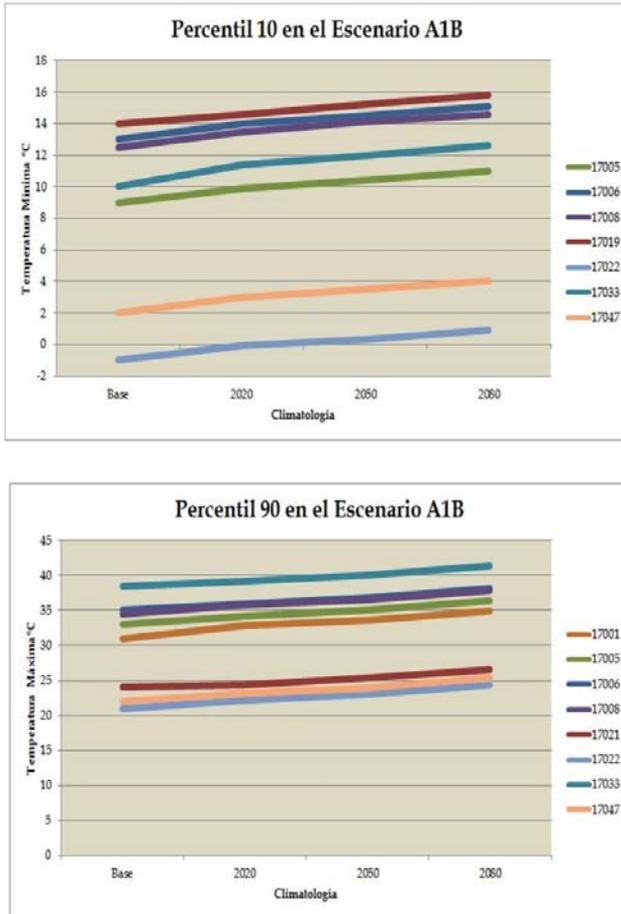


Figura 2.17. Percentiles 10 y 90 para las temperaturas (°C) mínima y máxima en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A1B en algunas estaciones del estado de Morelos

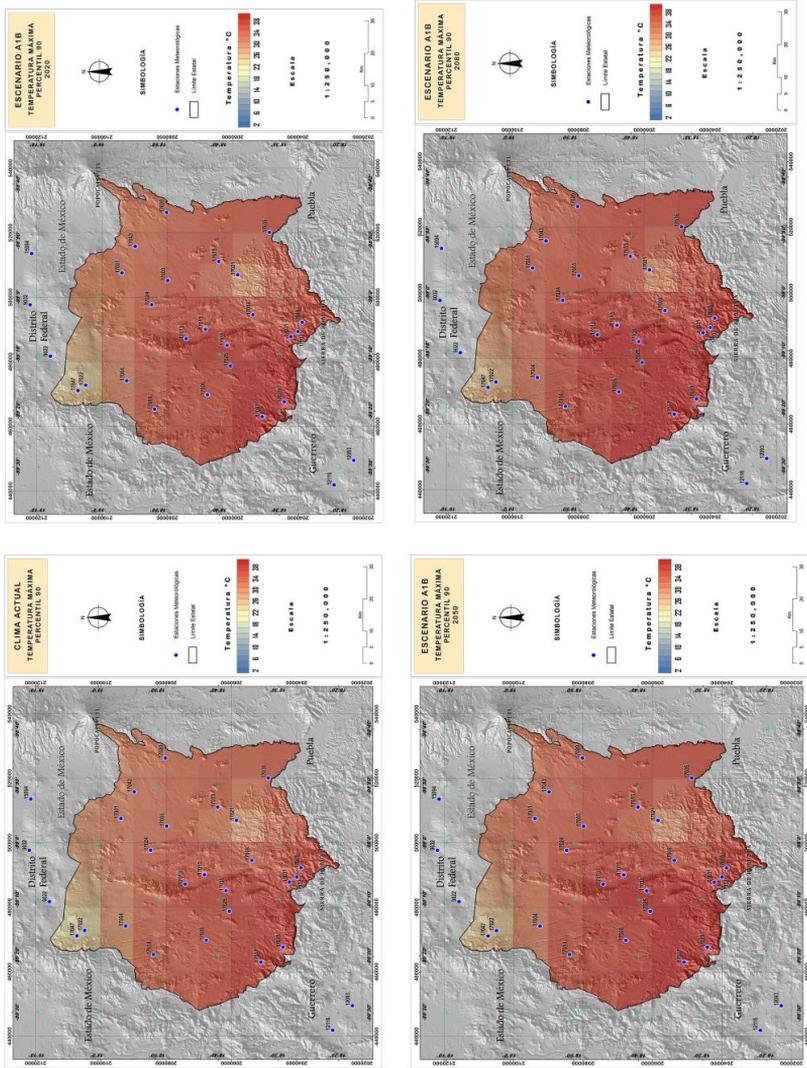


Figura 2.18. Escenarios de cambio en el percentil 90 para la temperatura máxima (°C) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A1B

Escenarios A1B y A2 del cambio en la precipitación en el estado de Morelos

Los escenarios de cambio de precipitación presentan, por lo general, un aspecto menos regular que los de temperatura. En la figura 2.19 se muestran los cambios del percentil 90 en los tres períodos con respecto al de referencia (base). Los percentiles mayores corresponden a las estaciones de mayor altitud. Para este caso, la precipitación en algunas estaciones aumenta entre 0.1 y 1 mm en el año 2020 y en otras disminuye desde 0.1 hasta 2.1 mm para el mismo período. Para la climatología 2050, los rangos van de 0.1 a 1 mm en los aumentos y de 0.1 a 2 mm en las disminuciones. En el caso del año 2080, éstos varían de 0.2 a 0.9 mm y de 0.2 a 2.2 mm, para aumento y disminución respectivamente (Tabla 2.7).

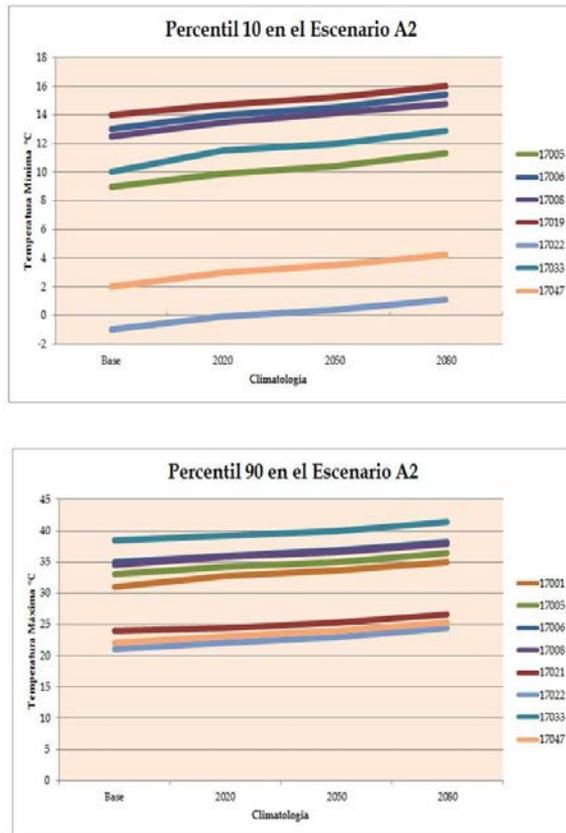


Figura 2.19. Percentiles 10 y 90 para las temperaturas (°C) mínima y máxima en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A2

Tabla 2.7. Percentil 90 de la precipitación para los escenarios A1B y A2

PERCENTIL 90 DE PRECIPITACIÓN		ESCENARIO A1B				ESCENARIO A2			
CLAVE ESTACIÓN	NOMBRE	LÍNEA BASE	A1B 2020	A1B 2050	A1B 2080	LÍNEA BASE	A2 2020	A2 2050	A2 2080
9022	Km 39.5 Cuernavaca ^a	14	14.4	14.4	14.2	14	13.5	13.5	13.2
9032	Milpa Alta	7	7.2	7.2	7.2	7	6.7	6.7	6.6
12093	P. Valerio Trujano	9.5	8.9	9.1	9	9.5	8.3	8.3	8.1
12116	Iguala (DGE)	10	10.1	10.3	10.1	10	9.4	9.5	9.2
15094	San Luis Ameca	6	6.4	6.4	6.3	6	6	6	5.9
17001	Atlatlahuacan	9.3	8.4	8.5	8.3	9.3	7.9	7.8	7.7
17004	Cuernavaca (DGE)	12	12.4	12.5	12.2	12	11.7	11.7	11.4
17005	Cuatla (DGE)	7.6	7.7	7.71	7.6	7.6	7.2	7.2	7
17006	El rodeo	9.2	8.4	8.5	8.3	9.2	7.9	7.9	7.7
17007	Huajintlán	10	10.4	10.5	10.3	10	9.7	9.7	9.5
17008	Huautla	8.8	6.7	6.8	6.6	8.8	6.3	6.3	6.3
17013	Temilpa	8	7.51	7.6	7.5	8	7.1	7.1	6.9
17014	Temixco (DGE)	8.2	8.2	8.2	8.1	8.2	7.61	7.7	7.5
17015	Tepalcingo	7	7.71	7.8	7.7	7	7.2	7.2	7.01
17016	Tequesquitengo	7.2	6.9	7	6.8	7.2	6.4	6.5	6.3
17018	Ticuman	8	7.2	7.3	7.1	8	6.8	6.9	6.6
17019	Tilzapotla	8	8.3	8.4	8.2	8	7.81	7.8	7.7
17020	Tlacotepec	9.6	9.8	9.9	9.7	9.6	9.1	9.2	9
17021	Tlacualera (S. F. Neri)	9.4	10.1	10.2	9.9	9.4	9.4	9.5	9.2
17022	Tres Cumbres	15.8	16.1	16.2	16.1	15.8	15.3	15.2	15
17024	Yautepec	7.9	7.9	8	7.8	7.9	7.5	7.5	7.3
17026	Zacatepec	7.3	7.5	7.6	7.4	7.3	6.9	7	6.8
17031	Jojutla (SMN)	7.5	7.6	7.7	7.4	7.5	7.1	7.1	7
17033	Xicatlacotla (CFE)	7	7.3	7.3	7.2	7	6.8	6.9	6.7
17036	Lagunillas de Rayón	6.8	6.6	6.7	6.6	6.8	6.2	6.2	6.1
17038	Nexpa	7.3	7.1	7.2	7	7.3	6.7	6.6	6.5
17043	Yecapixtla E.T.A. 118	9.5	10.5	10.5	10.4	9.5	9.7	9.7	9.5
17047	Huitzilac (DGE)	14.9	15.5	15.6	15.3	14.9	14.5	14.5	14.2

En cuanto a la precipitación, en la figura 2.20 se muestran los cambios del percentil 90 en los tres períodos con respecto al de referencia (base). Los percentiles mayores corresponden a las estaciones de mayor altitud. Para este caso, la precipitación en la mayoría de las estaciones disminuye entre 0.2 y 2.5 mm en el 2020 y en las restantes aumenta entre 0.1 y 0.2 mm para el mismo período. Para la climatología 2050 los rangos van de 0.1 a 2.5 mm en las disminuciones. En el caso del 2080 predomina la disminución de la precipitación al igual que en la climatología anterior con valores que oscilan entre 0.1 y 2.5 mm (Tabla 2.7 y Figura 2.21).

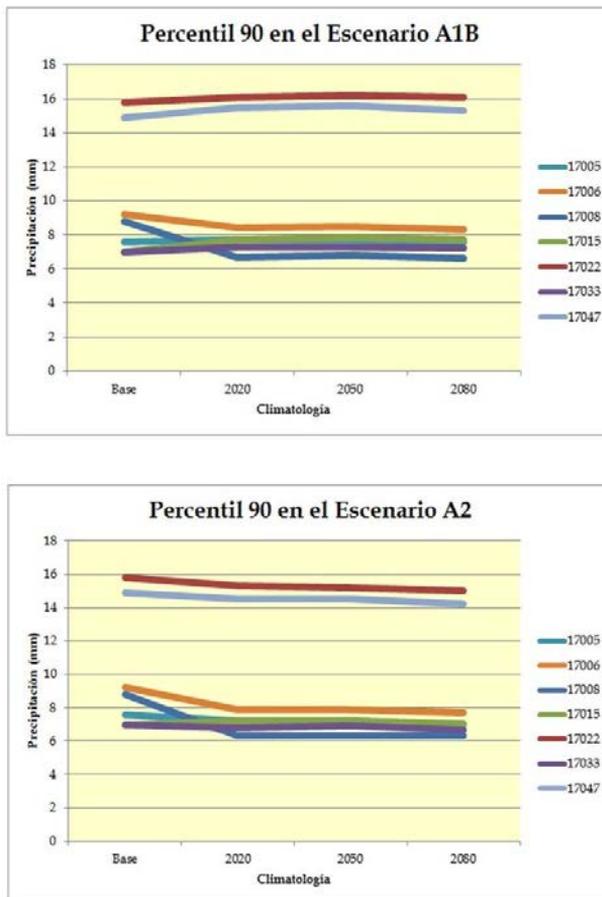


Figura 2.20. Percentil 90 para la precipitación (mm) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenarios de emisiones A1B y A2 en algunas estaciones del estado de Morelos

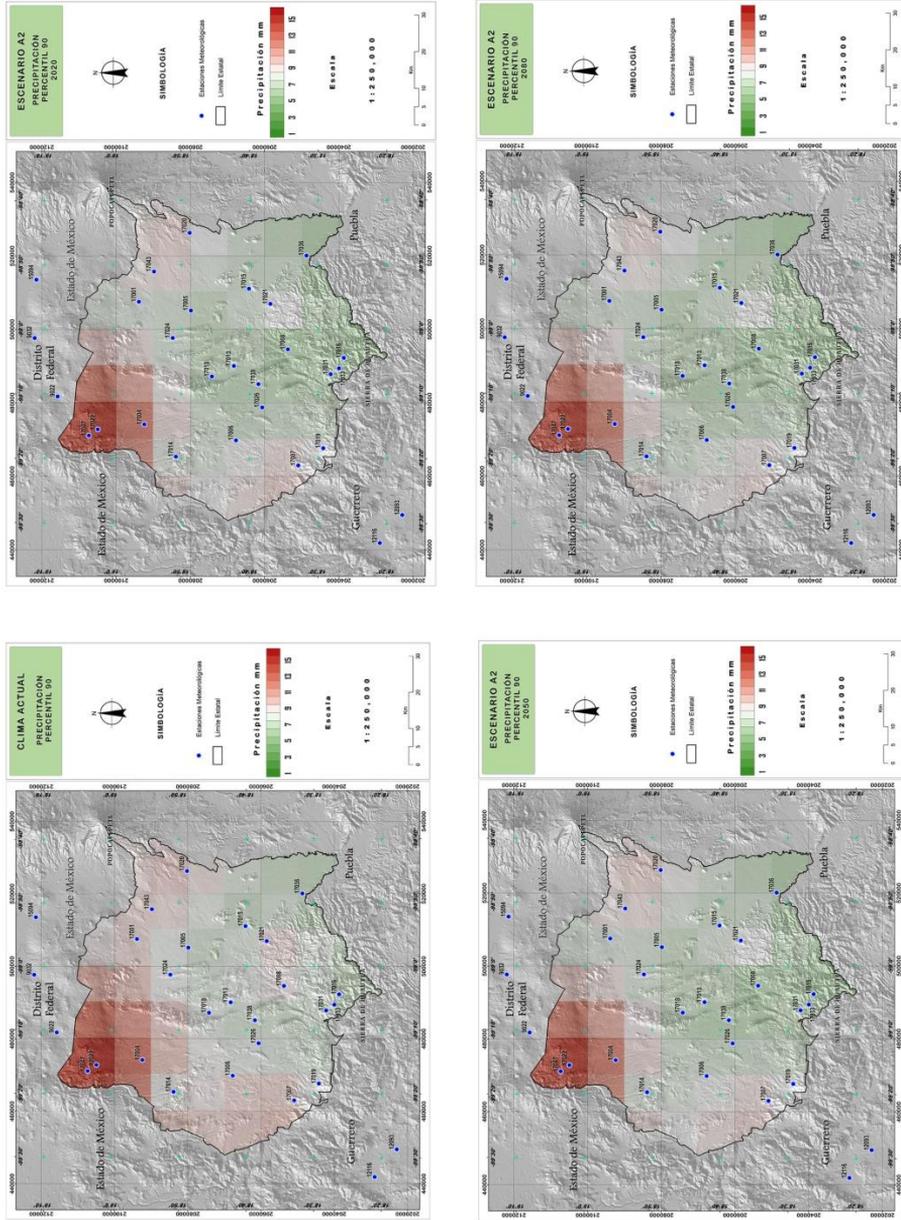


Figura 2.21. Escenarios de cambio en el percentil 90 para la precipitación (mm) en los años 2020, 2050 y 2080, para escenario de emisiones A2

Conclusiones

La región de estudio se caracteriza por contar con una amplia gama de climas, determinados principalmente porque ésta se localiza en una zona de transición entre las provincias biogeográficas neártica y neotropical, con un gradiente altitudinal que va desde los 3000 msnm en la zona norte hasta los 820 msnm en la zona sur. Así, la variabilidad de los regímenes de lluvia en el área de estudio está determinada por una serie de factores tales como la existencia de diferentes provincias biogeográficas, características fisiográficas de los lugares en donde se encuentran las estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis, uso del suelo, actividad humana directa y el calentamiento global.

En el período 1961-2008 se observó una tendencia al incremento de la temperatura máxima y al número de períodos cálidos. La tendencia al aumento de la temperatura mínima no fue generalizada en todas las estaciones estudiadas, no obstante, en varias de ellas también se observó este comportamiento. Las precipitaciones anuales también mostraron una tendencia al aumento en la mayor parte de las estaciones analizadas, principalmente de la zona norte, y se evidenciaron señales de retraso en el comienzo de la estación lluviosa.

Los datos indican una variabilidad del régimen de lluvias en las diferentes zonas del estado, encontrando una disminución en la precipitación anual total en el sur durante el período analizado, un ligero aumento en los valles centrales y una tendencia a aumentar en las regiones altas del centro y el noroeste. Las zonas agrícolas muestran una tendencia a mantener constante la precipitación anual total aunque hay casos en los que la duración de la temporada de lluvias ha disminuido casi diez días. Las fechas del inicio y terminación de la temporada de lluvias, y por lo tanto su duración e intensidad, también muestran variabilidades consistentes con la zona del estado en donde se encuentren.

Según los escenarios climáticos A1B y A2, analizados para los años 2030, 2050 y 2080 para el Estado de Morelos, se proyectan aumentos continuos de la temperatura media anual del aire, desde 0.5° hasta 3.8°C, notándose que en el escenario A2 se presentó un aumento en la pendiente de la curva a partir del año 2050, señalando así una tendencia mayor al aumento de la temperatura en este escenario. Así, el escenario A2 mostró una mayor anomalía en la temperatura media del aire para el año 2080 (3 ± 0.8), indicando un aumento de casi 4°C en la temperatura.

La proyección del escenario A1B para los años 2020, 2050 y 2080, de acuerdo a los resultados del LARS en relación a la temperatura mínima, muestra en general el mismo patrón en todas las estaciones, marcando un aumento de la temperatura mínima para el año 2080, es decir, los días fríos serán menos fríos debido al calentamiento global.

Con respecto a la temperatura máxima, ésta variará de 0.4° a 3.9 °C. El valor máximo corresponde a la estación Huajintlán con datos de hasta 43.3°C para el año 2080. En la estación Tlacualera, ubicada en la zona suroriente del estado, a 2605 m de altitud, se observan las mínimas variaciones en la temperatura máxima que van desde 0.4° hasta 2.6°C; mientras que en la estación de Atlatlahucan, a 1630 m de altitud, se observan los mayores aumentos en la temperatura máxima, que van desde 1.8°C en el año 2020 hasta 3.9°C en el año 2080.

En el caso de la precipitación, las proyecciones analizadas mostraron tendencias a la disminución de las lluvias en ambos escenarios, siendo que en el A2 se observó la anomalía en el porcentaje de precipitación para el año 2080 más grande, con un valor de -8.8%. Las fechas del inicio y terminación de la temporada de lluvia, y por lo tanto su duración e intensidad, mostraron también variabilidad.

Si se consideran las dispersiones de los modelos, el rango de probabilidad de cambio de la precipitación va desde 8% hasta -15% en el caso del escenario A1B, y desde 5.2% hasta -20.8% en el escenario A2, el cual es un rango muy amplio de variabilidad. Estos enormes rangos de variabilidad generan mayor incertidumbre en cuanto a la valoración de la vulnerabilidad de los sectores relacionados con el agua.

Referencias bibliográficas

- Bologaro Crevenna R. A., Torres J. V., Chavarría M., Delgado M., Atakishiyev A., Sarmiento y Álvarez L. J. (2012). Variability of rainfall regimes in Central Mexico, 1961-2008 (Atmósfera, enviado).
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Naciones Unidas. Nueva York, EEUU, 26 pp.
- Conde A. C. y Gay C. (coord.). (2008). Guía para la Generación de Escenarios de cambio Climático a Escala Regional, Primera versión. Noviembre, 2008, Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM. México, D.F. 104 pp.
- Díaz G. (2006). Sistema de consulta y procesamiento de información climatológica de México. 1er Foro del Medio Ambiente Atmosférico en el Estado de Veracruz Xalapa, Veracruz, 9 y 10 de febrero de 2006, México. 12 pp.
- Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) (2011): <http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.shtml>.
- 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". IPCC. Ginebra, Suiza, 74 pp. + anexos.
- Magaña V., Méndez J. M., Morales R. y Millán C. (2004). "Consecuencias presentes y futuras de la variabilidad y el cambio climático en México" en Martínez J. y

- Fernández A. (2004). Cambio Climático: una visión desde México. SEMARNAT-INE. 523 pp.
- SEMARNAT-INE. (2006). México Tercera comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. México, D.F. 254 pp. <http://www.ine.gob.mx/cclimatico/comnal3.html>.
- SEMARNAT-INE. (2010). Manual de uso del Sistema de Información de Escenarios de Cambio Climático Regionalizados. 17 pp.
- Semenov M. A., Brooks R. J., Barrow E. M. y Richardson C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. *Climate Research* 10, 95-107.
- Zhang X. y Yang F. (2004). RclimDex 1.0. Departamento de Investigación Climática del Servicio Meteorológico de Canadá. Obtenido el 9 de noviembre de 2010. <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/software.html>.



**VULNERABILIDAD DEL
RECURSO HÍDRICO EN
EL ESTADO DE MORELOS
ANTE EL
CAMBIO CLIMÁTICO**

3
CAPÍTULO

CAPÍTULO 3

VULNERABILIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN EL ESTADO DE MORELOS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Andrea Bolongaro Crevenna Recaséns^{3*}
Vicente Torres Rodríguez*
Oscar Pohle Morales*
Jerónimo Chavarría Hernández*
Fernando García Vicario*

Introducción

El territorio morelense ha sido considerado tradicionalmente dentro de los estados privilegiados en cuanto a clima y recursos hídricos se refiere, esto último considerando las altas precipitaciones que se observan en su porción norte, en la sierras de Chichinautzin y Nevada; así como por la presencia de numerosos manantiales de gran caudal, asociados generalmente con amplios balnearios y zonas turísticas de renombre nacional e internacional. Sin embargo, esto es aparente, ya que Morelos ocupa el 15º sitio por su precipitación promedio, superando modestamente la media nacional de 772 mm. Tal percepción ha sido inducida históricamente por la abundancia del recurso hídrico en municipios tales como Cuernavaca, Temixco, Xochitepec y Cuautla, los cuales en realidad aprovechan las zonas de recarga de las sierras mencionadas y constituyen las cabeceras de las corrientes perennes que alimentan al río Amacuzac.

Por otra parte, existe la percepción social de que el clima y particularmente la lluvia han cambiado en los últimos años. La población menciona que los días son más cálidos, las lluvias más torrenciales y los días fríos son más fríos. Esta percepción coincide los resultados de las diversas modelaciones sobre el efecto del cambio climático global en parámetros tan importantes como las temperaturas promedio, máximas y mínimas, y la precipitación pluvial.

En efecto, en el estudio “Escenarios de cambio climático en el estado de Morelos” (ver capítulo 2), los autores detectaron una tendencia histórica de incremento de la temperatura máxima y en el número de períodos cálidos en el estado de Morelos. También mostraron resultados contrastantes en el tema de precipitación, con base en el análisis histórico del período 1961-2008: mientras en la zona norte la tendencia es al incremento en las lluvias, en la zona sur es de su disminución. Además, detectaron

^{3*} Investigadores de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo

señales de retraso en el comienzo de la estación lluviosa y de acortamiento en la temporada de lluvias.

En el estudio antes mencionado, los escenarios climáticos analizados para las décadas de los años 2020, 2050 y 2080 proyectan aumentos en la temperatura media anual, desde 0.5°C hasta 3.8°C, según los modelos considerados, llegando inclusive a los 4.3°C en la zona sur. Los mismos modelos para el caso de la precipitación muestran que la tendencia en el estado de Morelos es la de la disminución de la cantidad de lluvias y la disminución del número de días lluviosos, lo que significa un incremento en la intensidad de este fenómeno. Las características descritas anteriormente coinciden en general con la percepción de la población.

Bajo este panorama, el tema de disponibilidad y vulnerabilidad del agua debe analizarse, tanto desde la perspectiva de las tendencias históricas como de la modelación de escenarios de cambio climático y sus efectos en diversos sectores.

Factores tan importantes como el incremento de la temperatura, la disminución de la precipitación y el incremento de la intensidad de la lluvia, tienen efectos potenciados en el balance hídrico, dando casi siempre resultados adversos. De esta manera es entendible que a mayor temperatura, mayor evapotranspiración (pérdida de agua); a menor precipitación, menor disponibilidad de agua para la recarga de acuíferos, y a mayor intensidad de la lluvia, menor oportunidad para que el agua se retenga en los suelos y se filtre hacia los mantos acuíferos, acelerando además los procesos de erosión. Cualquier balance hídrico que se realice con estos parámetros conducirá a resultados de déficit de agua y de vulnerabilidad de este recurso, coincidiendo con los niveles históricos ya observados, como con las proyecciones bajo el efecto del cambio climático.

En este capítulo se abordarán los temas de disponibilidad y de vulnerabilidad del agua, tomando como eje de discusión la ecuación de balance hídrico, cuyos componentes (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración y almacenamiento) son afectados por las variaciones de la temperatura y de la precipitación en entornos de cambio climático.

Mucha de la terminología y de la información climática y de cambio climático utilizada en esta sección proviene del capítulo de “Escenarios de cambio climático en el estado de Morelos” (ya mencionado) por lo que se invita al lector a acudir a dicho apartado de la presente publicación para obtener referencias.

Disponibilidad de agua en el estado de Morelos

Hidrografía

La cuenca del Río Balsas-Mezcala es una de las más importantes de México ya que cubre un área de 109,618 km², lo que representa el 6% del área total del territorio nacional. Esta región hidrológica se denomina RH-18 río Balsas y abarca por completo al estado de Morelos (CEAMA, 2009). Dentro del estado, la región RH-18 río Balsas se subdivide en tres cuencas: la cuenca del río Nexapa o Atoyac con 673.17 km²; la cuenca del río Balsas-Mezcala con 1.6 km²; y la cuenca del río Grande de Amacuzac, con una superficie de 4,303.39 km². Por su parte, la cuenca del río Grande de Amacuzac contiene las subcuencas de los ríos Bajo Amacuzac, Cuautla, Yautepec, Apatlaco, Tembembe y Alto Amacuzac.

Hidrogeología

El norte y sur de Morelos son zonas de recarga, y el centro de descarga, con la presencia de una depresión relativa en el suroeste de la entidad, hacia la que fluyen la mayoría de los escurrimientos superficiales y subterráneos.

Morelos está casi totalmente rodeado por relieves endógenos volcánicos acumulativos, cuya altitud y permeabilidad de las rocas que lo componen forman las principales zonas de recarga de los acuíferos, localizándose éstas en las sierras del Chichinautzin, Zempoala y Nevada. En estas sierras afloran derrames lávicos fracturados, intercalados con depósitos piroclásticos semiconsolidados. La dirección predominante del flujo de agua subterránea es de Norte a Sur y de Norte a Suroeste.

Otra zona de recarga, menos importante, se ubica en el complejo oligo-miocénico volcánico del sur de Morelos, integrado por rocas ígneas extrusivas que corresponden a las sierras de San Gabriel, Tilzapotla y Huautla.

Con el fin de administrar las aguas subterráneas, la CNA (2002), ha definido cuatro zonas acuíferas en el estado de Morelos, que son: los acuíferos de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan (Figura 3.1).

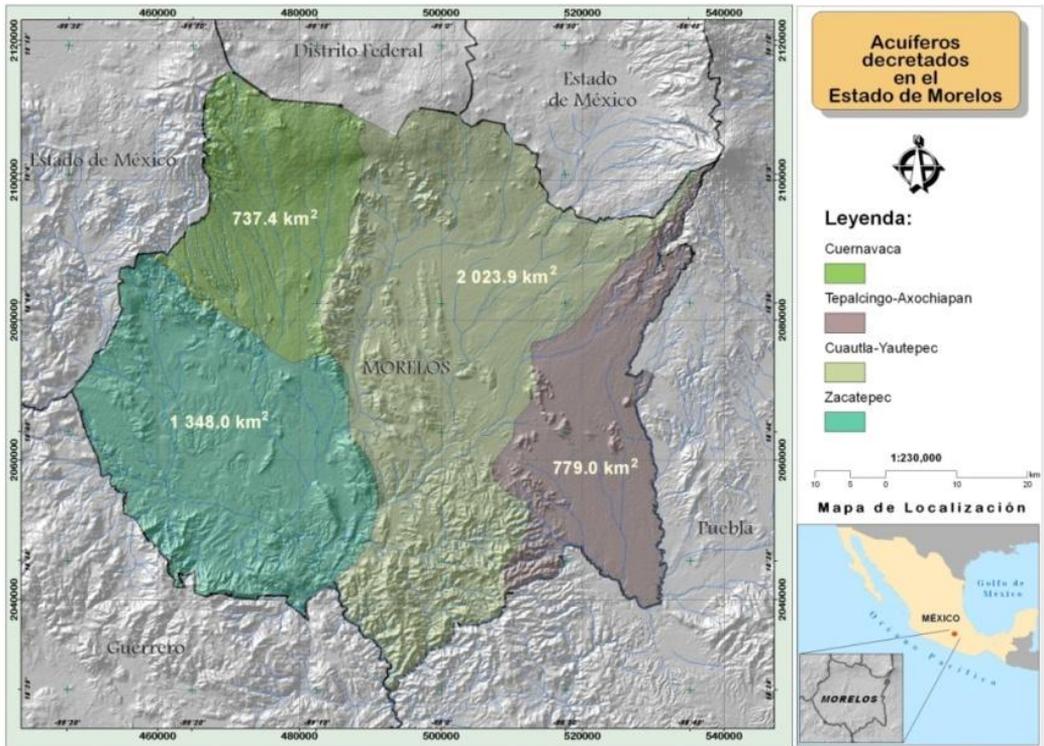


Figura 3.1. Acuíferos del estado de Morelos

Acuífero Cuernavaca

El acuífero del valle de Cuernavaca está formado por una zona de recarga, un acuífero superior, un paquete de formaciones confinantes y un acuífero profundo. El grupo Chichinautzin y la formación Cuernavaca constituyen el acuífero superior. El grupo Balsas y las formaciones Tepoztlán y Mexcala, actúan como confinantes. Las formaciones Cuautla y Morelos forman el acuífero inferior.

Por otra parte, la formación Tepoztlán constituye una barrera al flujo subterráneo que circula en las rocas del grupo Chichinautzin, propiciando su división; una parte fluye hacia el acuífero Cuautla-Yautepec y otra, rumbo al valle de Cuernavaca. Cortés y Vázquez (1991) realizaron un estudio, por medio de técnicas isotópicas, en el que mencionan que en el acuífero superior del valle de Cuernavaca (actualmente en explotación) el tiempo de residencia del agua es menor a cuarenta años.

Acuífero Cuautla-Yautepec

En el valle de Cuautla-Yautepec se encuentran acuíferos constituidos por clastos no consolidados, rocas volcánicas fracturadas y calizas arrecifales (SARH, 1989). En las porciones norte y oriente de dicho valle, rocas volcánicas del grupo Chichinautzin forman acuíferos “colgados” con niveles freáticos, muy someros, que contienen agua de buena calidad y sostienen la descarga de los manantiales localizados en el área de Oaxtepec. Los materiales aluviales y las rocas volcánicas conforman el acuífero superior, de geometría irregular y espesor de hasta 150 metros en el área de Yautepec, el cual es captado por la mayoría de los pozos existentes en la zona. El acuífero de Cuautla-Yautepec contiene agua de calidad para todo uso, aunque en el área de Cuautla su porción superior está contaminada por la infiltración de agua residual urbana y por los lixiviados de un depósito de residuos urbanos no controlado.

La mayor parte de la recarga del acuífero del valle de Cuautla-Yautepec proviene de las formaciones basálticas que se encuentran en el abanico comprendido entre los poblados de Tlayacapan y Yecapixtla. Otra parte de la recarga, aunque no tan cuantiosa, parece provenir de la zona que se encuentra al Sur de este último poblado (SARH, 1981). El flujo proveniente de las zonas mencionadas fluye en su mayor parte hacia la zona de Cuautla, donde se le une el flujo procedente del sur de Yecapixtla, para drenar hacia el río Cuautla. La parte restante de la descarga fluye hacia el río Yautepec.

En otro estudio, la SARH (1989) reporta que la recarga de los acuíferos es, en conjunto, superior a los 400 millones de metros cúbicos por año y es originada principalmente en áreas montañosas; la mayor parte de este volumen transita y es descargado por el acuífero calizo regional (más profundo) que funciona como dren de los acuíferos someros. Por lo anterior, el mismo estudio estima factible extraer cantidades adicionales de agua subterránea del valle de Cuautla-Yautepec, tanto del acuífero superior como del calizo, aunque la disponibilidad de agua es mucho mayor en este último.

Acuífero Tepalcingo-Axochiapan

Los depósitos clásticos continentales constituyen el acuífero que actualmente se explota en el valle de Axochiapan-Tepalcingo. La granodiorita Jantetelco (Cerro Gordo y Sierra del Camello) y la diorita Xalostoc (skarn) se consideran impermeables por ser intrusivos y son barreras al flujo subterráneo. El acuífero está confinado por la formación Mexcala. Jaimes-Palomera y Cortés (1991) suponen una circulación “kárstica” en el acuífero, donde el líquido circula perfectamente a lo largo de los planos de la estratificación de las formaciones Cuautla y Morelos que funcionan como drenes subterráneos. Estos drenes se extienden más allá del límite suroccidental de Morelos (hacia Puebla) ya que la geoforma plana del sureste de la entidad ha facilitado que el agua subterránea aflore fuera de Morelos y ya que las regiones relativamente planas de la cuenca del Nexapa

estuvieron cubiertas por lagos a fines de la era Mesozoica, los materiales arenosos del fondo de dichas áreas lacustres han facilitado la infiltración.

Acuífero de Zacatepec

La SARH (1981) presenta un estudio geohidrológico preliminar del valle de Zacatepec que cubre un área aproximada de 1,100 km², abarcando los municipios de Amacuzac, Jojutla y Tlaltizapán, parte de Mazatepec, Puente de Ixtla, Tetecala, Tlaquiltenango y Zacatepec. En esta región la actividad económica principal es la agricultura de caña de azúcar y el arroz.

En la zona se presentan una serie de afloramientos de sedimentos de origen marino que en conjunto forman sierras alargadas con dirección predominante Noreste y Suroeste, lo que constituye en la porción nororiental del río Amacuzac una serie de plegamientos.

Según el estudio referido, el acuífero del valle de Zacatepec se encuentra en equilibrio, y se forma por zonas de recarga y descarga, un acuífero superior, un paquete de formaciones confinantes y un acuífero profundo. La zona de recarga está localizada en rocas ígneas extrusivas terciarias del grupo Buena Vista y la Riolita Tilzapotla que corresponden a las sierras de San Gabriel y Tilzapotla, respectivamente. La descarga se ubica en el valle de Zacatepec en materiales sedimentarios de las formaciones Cuautla y Morelos. Por otra parte, el Grupo Balsas y la formación Mexcala actúan como confinantes de los acuíferos superior y profundo, integrados por las formaciones Cuernavaca y Cuautla y Morelos, respectivamente.

Disponibilidad actual de agua subterránea

Tabla 3.1. Distribución de la precipitación anual en Morelos

Variable hidrológica		Vol. en hm ³	% sobre la Precipitación	
Volumen de precipitación, promedio anual: 4,842.0 hm ³	Evapotranspiración	3,002.04	62	
	Escurrimiento superficial	726.30	15	
	Infiltración	Recarga acuíferos	387.36	8
		Aprovechamiento en manantiales	726.30	15
	Suma:	4,842	100	

Fuente: Organismo de Cuenca Balsas, CONAGUA, 2009.

Según estimaciones oficiales, se considera que la precipitación media anual dentro del territorio morelense es de 980 mm, dando como volumen potencial un total de 4,842

hm³ (considerando una superficie de 4,941 km²). La distribución que se tiene sobre dicho volumen es el que se muestra en la tabla 3.1 (CONAGUA, 2010).

Desde el punto de vista de la administración pública del agua, la disponibilidad de este recurso se calcula por medio de la NOM-011-CNA-2000, estando a cargo de la CONAGUA publicar periódicamente los resultados. Con base en los valores establecidos en el último decreto publicado en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 28 de Agosto de 2009, se considera una disponibilidad de agua subterránea de 21.31 hm³ para el acuífero de Cuernavaca, de 7.11 hm³ para el acuífero Cuautla-Yautepec, de 20.01 hm³ para el acuífero Zacatepec y un Déficit de -3.28 hm³ para el acuífero Tepalcingo-Axochiapan (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Disponibilidad de agua subterránea en el estado de Morelos

Acuífero	Millones de metros cúbicos anuales			
	R (recarga media anual)	DNCOM (descarga natural comprometida)	VCAS (volumen concesionado de agua subterránea)	DAS (disponibilidad de agua subterránea)
Cuernavaca	395	175.2	198.49	21.31
Cuautla-Yautepec	319.2	223.9	88.19	7.11
Zacatepec	378	319.8	38.19	20.01
Tepalcingo-Axochiapan	43.8	11.4	35.68	-3.28

Fuente: DOF, publicado el 28 de agosto de 2009.

Balance hídrico espacialmente distribuido

Metodología

El balance hídrico de una cuenca es una estimación de los volúmenes de agua que ingresan, que salen y que se almacenan dentro de la misma. Aplicando el principio de conservación de masas y de la energía, la ecuación de balance es sencilla y de aceptación general entre los estudiosos del tema, siendo una de sus formas la siguiente:

$$\Sigma Entradas = \Sigma Salidas \pm \Sigma Almacenamiento$$

Los términos de entradas de agua a una cuenca comprenden la precipitación (P) y las entradas de aguas superficiales (Q_{sl}) y subterráneas (Q_{ul}) de cuencas adyacentes. Los términos de salida de agua comprenden las pérdidas por evapotranspiración (E), el escurrimiento superficial (Q_{sO}), la infiltración (I), y el cambio de almacenamiento (S)

pudiéndose plantear la ecuación general de balance hídrico como (Sokolov y Chapman, 1981):

$$P + Q_{sl} + Q_{ul} - E - Q_{sO} - I - \Delta S - v = 0$$

La ecuación anterior incluye al término v que corresponde a un residual o una diferencia, debido a que todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o de estimación.

La estimación del balance hídrico puede efectuarse mediante dos tipos de modelos que requieren diferente nivel de información: los modelos agregados y los modelos espacialmente distribuidos. En los modelos agregados los parámetros y variables son los valores promedio de las propiedades de toda la cuenca, es decir, se consideran como una sola unidad (Brooks *et al.*, 1992; Chow *et al.*, 1988; Dunne y Leopold, 1978; Chow *et al.*, 1964). Por otra parte, los modelos espacialmente distribuidos consideran la variabilidad espacial de los parámetros y de las variables que caracterizan la cuenca (Olsson y Pilesjo, 1999; Meijerink *et al.*, 1994; Olivera, 1996; Maidment *et al.*, 1996 y 1993).

En el presente estudio se ha aplicado el modelo espacialmente distribuido utilizando la tecnología de análisis espacial, disponible en sistemas de información geográfica. A esta metodología la llamaremos de aquí en adelante el "Análisis Espacial Distribuido" (AED). Sus principios son los siguientes:

1. Utiliza la misma ecuación de balance hídrico de uso general.
2. Las cuencas y los acuíferos están formados por celdas de tamaño regular que conforman una malla que se adapta al tamaño de la superficie de la cuenca o del acuífero.
3. Todos los cálculos de balance hídrico se realizan por cada celda de la malla ("pixel"), lo que permite calcular balances hídricos de superficies pequeñas.
4. Los cálculos de las variables climáticas (precipitación, temperaturas, evapotranspiración real y potencial, etcétera) se realizan para cada estación climática disponible, es decir, no se hacen promedios de estaciones sino que los datos se regionalizan posteriormente para formar mallas de datos regionalmente distribuidos, calculados por métodos de interpolación.
5. Se utilizan las tecnologías de análisis espacial, disponibles en los sistemas de información geográfica, y se programan para cálculos específicos. Incluyen álgebra de mapas, utilización de condiciones booleanas, algoritmos de interpolación, entre otros.
6. Permite la realización de cálculos y relaciones con variables continuas y discontinuas.

7. Permite calcular diversos modelos que utilizan la base de datos primaria disponible, permitiendo evaluar otros modelos, introducir nuevas variables espacialmente distribuidas (por ejemplo datos satelitales) y programar algoritmos.
8. Los resultados se pueden expresar tanto para los límites naturales de las cuencas y los acuíferos, como para límites administrativos/políticos de aquéllos, ya que el método genera un balance hídrico por “pixel” o celda.

En términos generales, el AED genera mallas regulares a partir de datos originales con distribución irregular, tanto de fuentes continuas como discretas y sus relaciones. El tamaño de las mallas depende del tamaño de las cuencas y de los acuíferos a estudiar. Para el caso de Morelos se optó por una malla regular con celdas de 5 km de lado. El método puede aplicarse a mallas más detalladas (por ejemplo, 1 km) dependiendo de la calidad de la información de origen.

Geomática y análisis espacial

La estimación del balance hídrico requiere de coberturas (mallas) con los datos de las variables de la ecuación de balance hídrico espacialmente distribuidos. Cada variable considerada es, de por sí, compleja en cuanto a su fuente de información y disponibilidad de la misma, requiriéndose combinar diversas fuentes de información y la conversión de datos, de proyecciones y de unidades.

El procedimiento general de integración se realizó en un sistema de información geográfica considerando:

Para el caso de los componentes de precipitación y evapotranspiración:

- Generación de la capa (“shapefile”) de las estaciones meteorológicas seleccionadas, teniendo entre sus atributos los valores de precipitación, temperatura, evapotranspiración real y agua excedente. Esto es, la elaboración de un balance hídrico por cada estación climática (28 estaciones disponibles con la calidad requerida). En la figura 3.2 se ilustra un ejemplo de resultado de balance hídrico para una estación.
- Interpolación espacial de cada una de las variables climáticas por el método de Kriging ordinario. En la figura 3.3 se muestra el resultado de la interpolación de la variable evapotranspiración a partir de 28 estaciones climatológicas.
- Cálculo de excedente hídrico:

$$\text{excedente hídrico} = (\text{Precipitación} - \text{Evapotranspiración})$$
- Exportación de variables de temperatura y precipitación, evapotranspiración y excedente hídrico en una malla de 5x5 km, en formato raster, todos ellos expresados en mm.

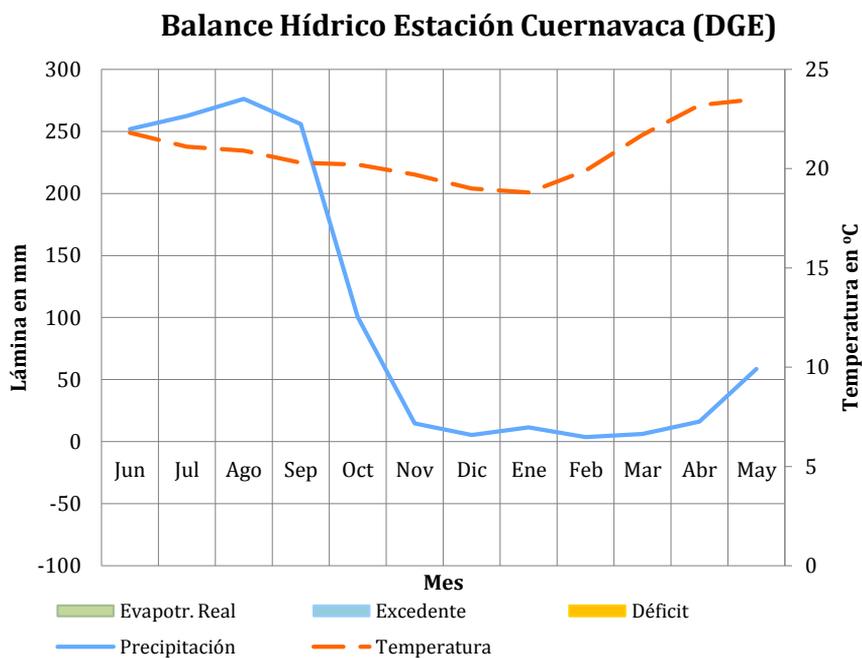


Figura 3.2. Ejemplo de balance hídrico de una estación climatológica. Caso estación Cuernavaca.

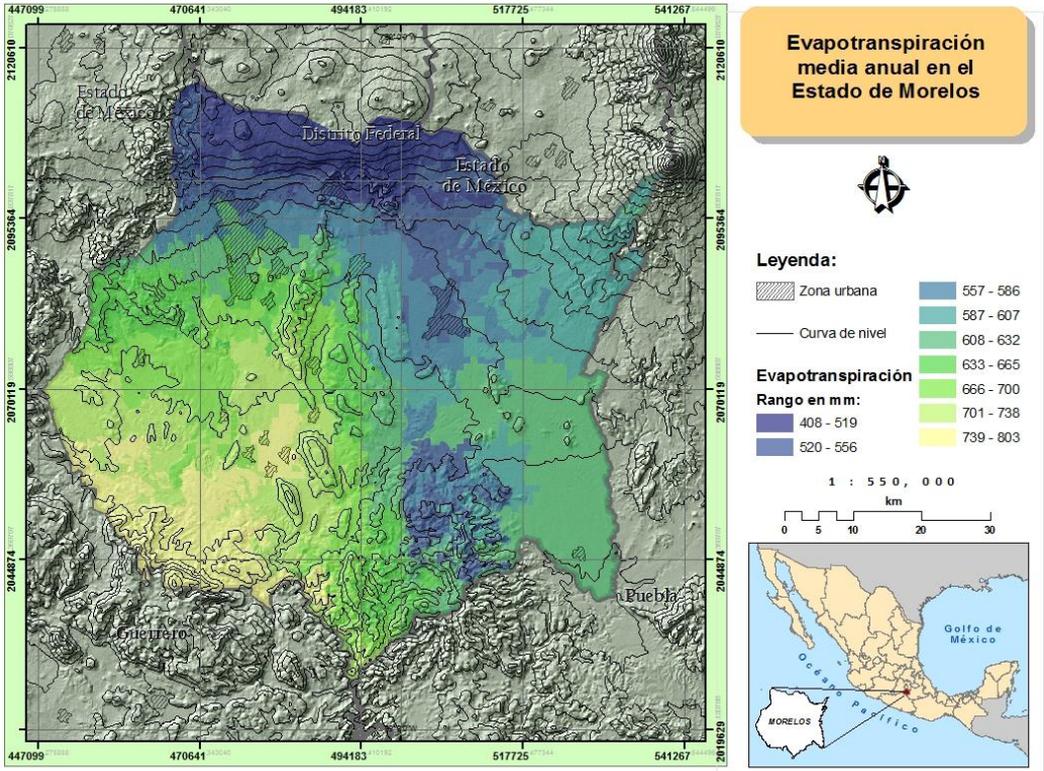


Figura 3.3. Mapa de evapotranspiración del estado de Morelos

Para el caso de los factores de infiltración y escurrimiento:

- Generación de las coberturas cuyos atributos corresponden a los factores biofísicos, tales como: vegetación, suelos, pendiente topográfica y geología.
- Álgebra de mapas con las coberturas de atributos biofísicos para la obtención de coberturas de factores de escurrimiento e infiltración en mm, a partir de coeficientes de escurrimiento convencionales (USDA, 1986), así como correcciones por el tipo de suelo y tipo de roca del sitio (Tabla 3.3).

Integración de variables climáticas y biofísicas en un modelo espacialmente distribuido

- Cálculo de volúmenes de escurrimiento e infiltración a partir de la integración de los balances hídricos contenidos en cada pixel con los polígonos generados a partir de los atributos biofísicos particulares.

Tabla 3.3. Factores de escurrimiento e infiltración, ajustados por condiciones geohidrológicas. Se ilustra la sección correspondiente a pendientes topográficas <1%.

Clasificación de vegetación, velocidad de infiltración y pendientes en coeficientes de escurrimiento		Condición geohidrológica (permeabilidad)			Factor de escurrimiento ajustado por condición geohidrológica						
		Pendiente < 1%(*)	Alta	Media	Baja	Alta		Media		Baja	
						Escurrimiento	Infiltración	Escurrimiento	Infiltración	Escurrimiento	Infiltración
Bosque y vegetación densa	Alta	0	1	0.5	0	1	0.5	0.5	1	1	0
	Media	0.2	1	0.5	0.2	0.8	0.6	0.4	1	1	0
	Baja	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0
Pastos y bosques abiertos	Alta	0.2	1	0.5	0.2	0.8	0.6	0.4	1	1	0
	Media	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0
	Baja	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0
Arbustos	Alta	0.1	1	0.5	0.1	0.9	0.6	0.5	1	1	0
	Media	0.3	1	0.5	0.3	0.7	0.7	0.4	1	1	0
	Baja	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0
Cultivos	Alta	0.2	1	0.5	0.2	0.8	0.6	0.4	1	1	0
	Media	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0
	Baja	0.5	1	0.5	0.5	0.5	0.8	0.3	1	1	0
Sin vegetación	Alta	0.1	1	0.5	0.1	0.9	0.6	0.5	1	1	0
	Media	0.3	1	0.5	0.3	0.7	0.7	0.4	1	1	0
	Baja	0.4	1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.3	1	1	0

(*) **Nota:** Para cada intervalo de pendiente topográfica característica existen tablas similares. Por ejemplo < 1%, 1-5%, 5-20%, 20-25% y mayor a 50%.

- Recorte de áreas de interés, tales como territorio estatal, cuencas y acuíferos, así como la cuantificación de sus balances correspondientes.

Se integraron mapas digitales de las siguientes coberturas: temperatura promedio, precipitación total mensual, escurrimiento superficial, infiltración, cobertura de suelo (vegetación, zonas urbanas, etcétera).

En las figuras 3.4 a 3.11 se ilustran algunas de las coberturas generadas para el cálculo de balance hídrico. Merece especial atención la conformación del mapa de coeficiente de infiltración (Figura 3.11) donde el papel de la conformación geológica se hizo preponderante. Así, las áreas menos permeables (en colores rojo, naranja y amarillo), se localizan en rocas andesíticas, riolitas, lutitas, conglomerados cementados y lahares, que pertenecen a las formaciones: Zempoala, Grupo Buenavista, Riolita Tilzapotla, Formación Mezcala, Grupo Balsas y Formación Tepoztlán, respectivamente. Por su parte, las zonas con permeabilidades bajas y medias se ubican principalmente en los valles que se encuentran cubiertos por depósitos vulcano-sedimentarios (Formación Tlayecac), lahares (Glacis de Buenavista) y aluviones intercalados con horizontes arcillosos de la Formación Cuernavaca. Las áreas con permeabilidades altas a muy altas se localizan principalmente en calizas, campos de lava y depósitos piroclásticos, que pertenecen a formaciones marinas del Cretácico Superior y emisiones volcánicas recientes según el orden enunciado.

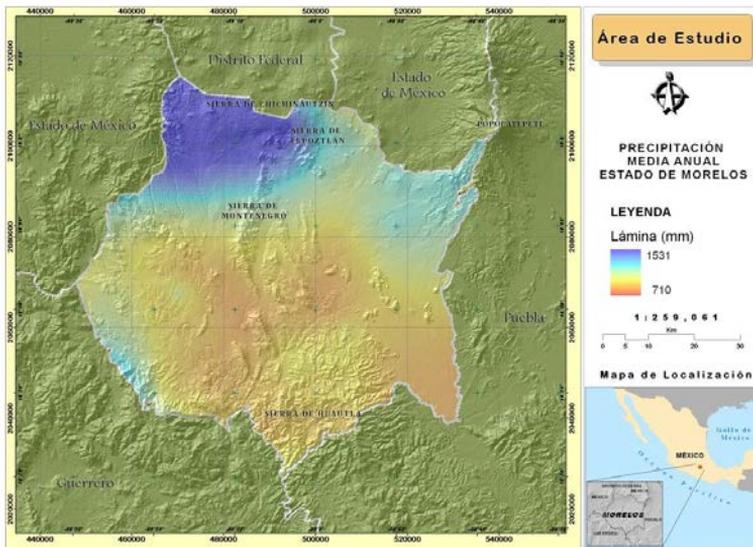


Figura 3.4. Mapa de precipitación media anual del estado de Morelos

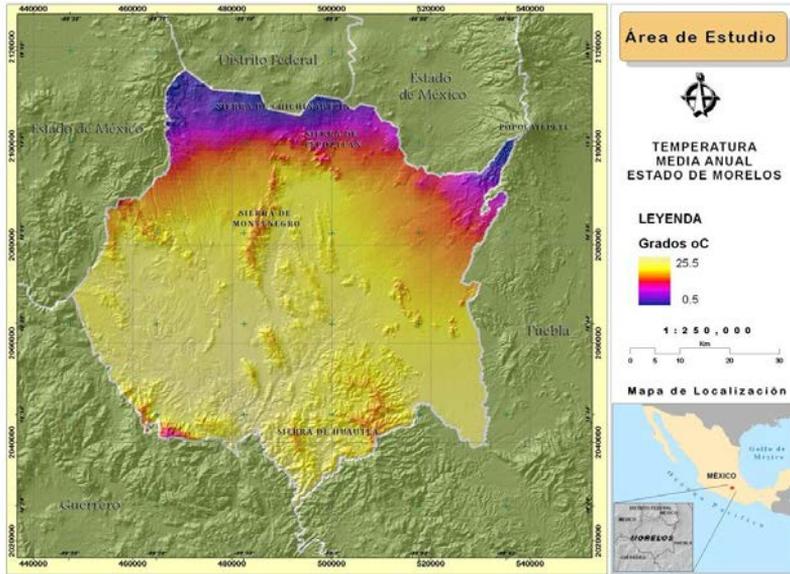


Figura 3.5. Mapa de temperatura media anual del estado de Morelos

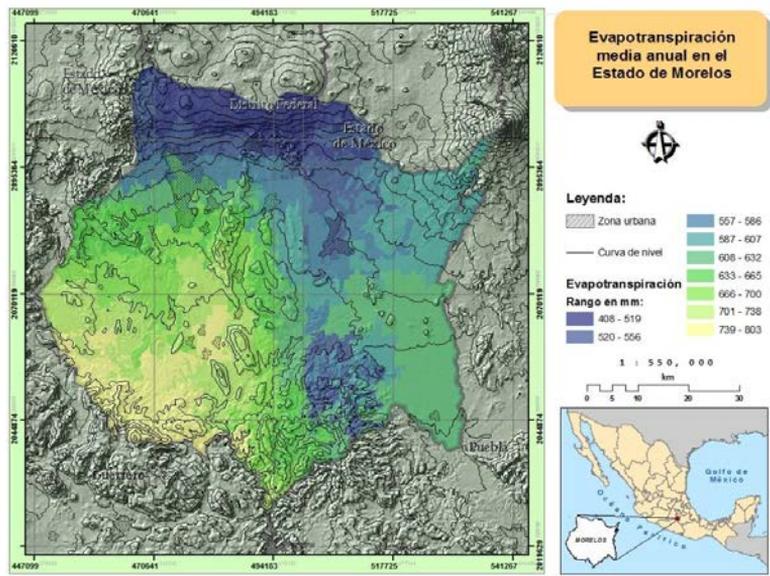


Figura 3.6. Mapa de evapotranspiración media anual del estado de Morelos

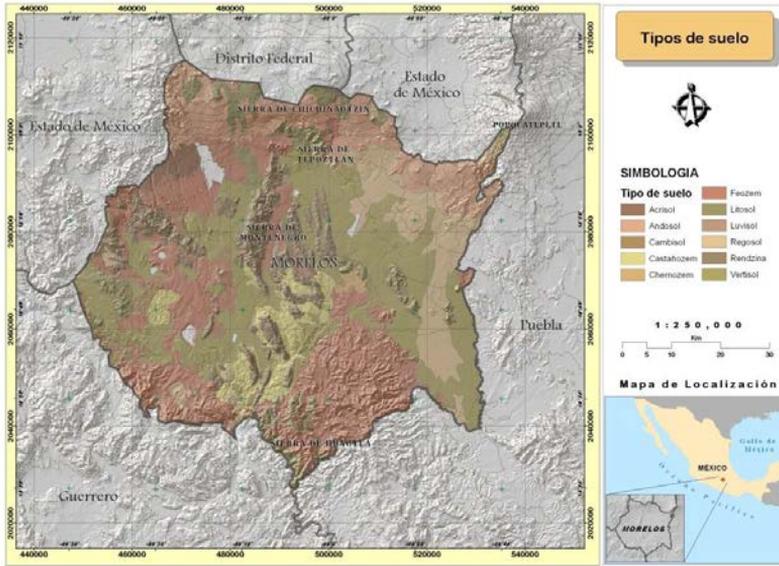


Figura 3.7. Mapa de tipo de suelo del estado de Morelos

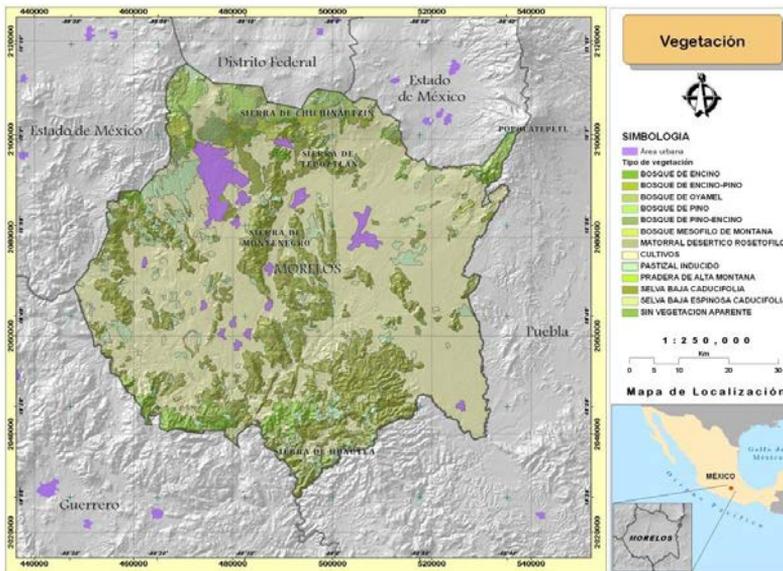


Figura 3.8. Mapa de Vegetación del estado de Morelos

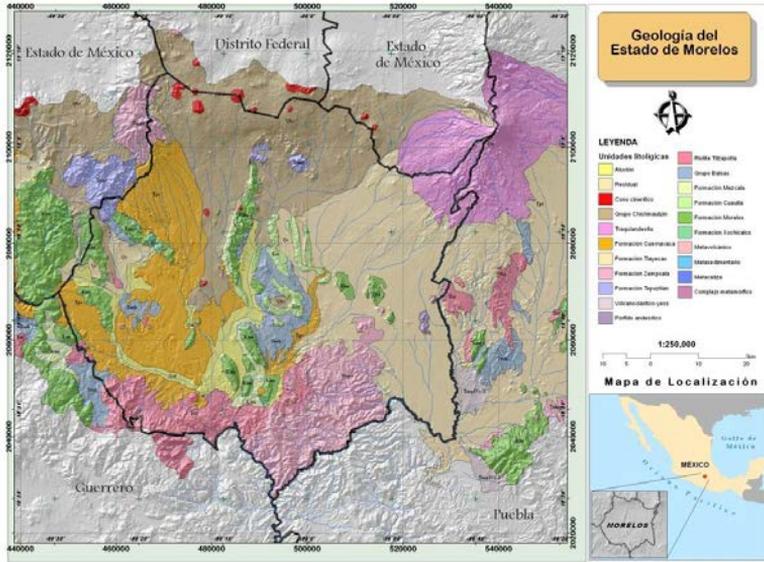


Figura 3.9. Mapa de geología del estado de Morelos

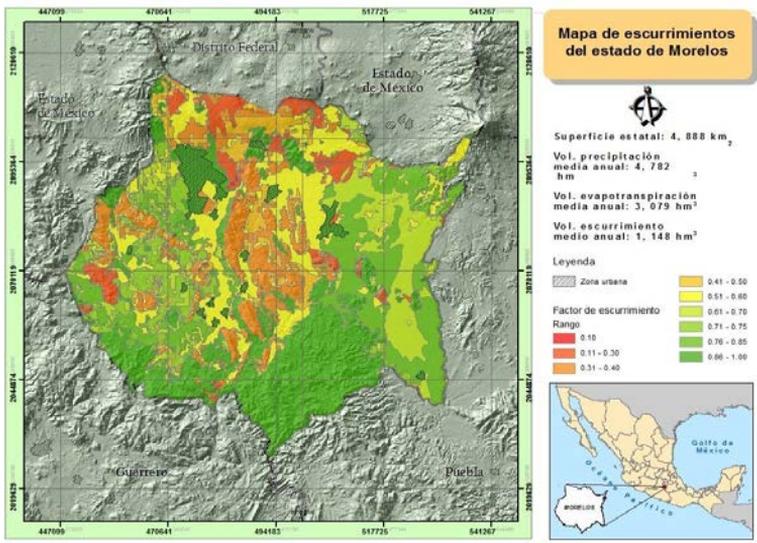


Figura 3.10. Mapa de factor de escurrimiento superficial del estado de Morelos

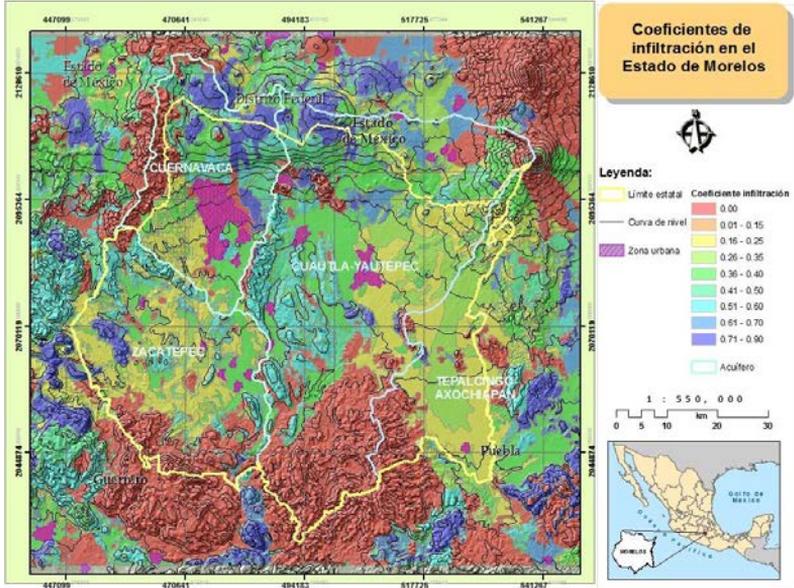


Figura 3.11. Mapa de coeficiente de infiltración del estado de Morelos

Balance hídrico espacialmente distribuido

Aplicando la metodología de análisis espacial distribuido se obtuvo el balance hídrico a nivel de todo el estado de Morelos, el cual mostró que la precipitación alcanza un total de 4,781 hm³, de los cuales el 64% se pierde por evapotranspiración, el 24% genera escurrimiento virgen y el 12% se infiltra (Figura 3.12 y Figura 3.13). El método también se aplicó para cuencas y acuíferos obteniéndose los resultados de la Tabla 3.4.

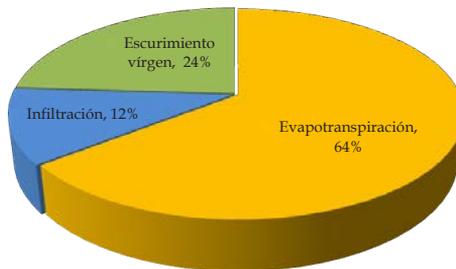


Figura 3.12. Resultado de balance hídrico para el estado de Morelos por el método de análisis espacial distribuido

Un parámetro importante que se calculó es el volumen excedente, definido aquí como la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración. En el presente trabajo se han calculado estos tres parámetros de manera separada por medio de álgebra de mapas, encontrándose ligeras diferencias a si se calculan simplemente como operaciones entre tablas de balance (Tabla 3.4).

Por otra parte, los cálculos de volúmenes de infiltración vertical y de escurrimiento virgen se obtuvieron aplicando los coeficientes de infiltración y de escurrimiento (obtenidos separadamente) al volumen de excedentes ya descrito. Se trata de que cada parámetro de la ecuación del balance hídrico se calcule por separado para garantizar la robustez del cálculo. En las Figuras 3.12 y 3.13 se muestran los resultados obtenidos de los volúmenes de infiltración vertical y de escurrimiento virgen para los acuíferos del estado de Morelos.

Tabla 3.4. Balance hídrico medio anual en cuencas y acuíferos del estado de Morelos, por el método de análisis espacial distribuido

Unidad	Nombre	Superficie (km ²)	Precipitación (hm ³)	Evapotranspiración (hm ³)	*Excedente (hm ³)	Infiltración (hm ³)	Escurreminto (hm ³)
Estado	Morelos	4,888.13	4,781.80	3,079.32	1,698.82	551.17	1,147.64
Acuífero	Cuernavaca	993.94	1,242.88	559.41	676.1	248.11	427.99
	Cuautla-Yautepec	2,700.66	2,529.73	1,605.28	908.36	309.44	598.92
	Zacatepec	1,248.18	1,205.82	900.39	309.94	96.08	213.86
	Tepalcingo-Axochiapan	670.51	602.53	405.21	198.46	44.94	153.52
	Suma:		5,613.29	5,580.96	3,470.29	2,092.86	698.57
Cuenca	Apatlaco	705.07	883.23	410.49	473.41	159.9	313.51
	Chalma-Tembembe	1,138.50	1,277.57	738.63	559.7	186.55	373.14
	Yautepec	1,640.04	1,605.11	956.95	614.8	292.76	322.12
	Cuautla	1,295.35	1,222.46	779.43	447.73	114.61	333.12
	Amacuzac*	738.66	674.4	537.32	139.74	20.65	119.09
	Nexapa*	666.97	599.36	403.37	197.26	45.37	151.89
Suma:		6,184.59	6,262.13	3,826.19	2,432.64	819.84	1,612.87

Nota: (*) Estimación de la superficie comprendida dentro del territorio del estado de Morelos.

Se observa que el acuífero con mayor infiltración vertical es el de Cuautla-Yautepec, debido a que posee la mayor extensión de recarga en la zona comprendida dentro de la Sierra Chichinautzin; le sigue en volumen de infiltración vertical el acuífero Cuernavaca, que a su vez es el más productivo por kilómetro cuadrado (0.266

hm³/km²); en menor proporción de infiltración vertical le siguen los acuíferos de Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan, ya que estos últimos se encuentran fuera de la zona de recarga de la Sierra Chichinautzin y sus unidades geológicas son menos permeables.

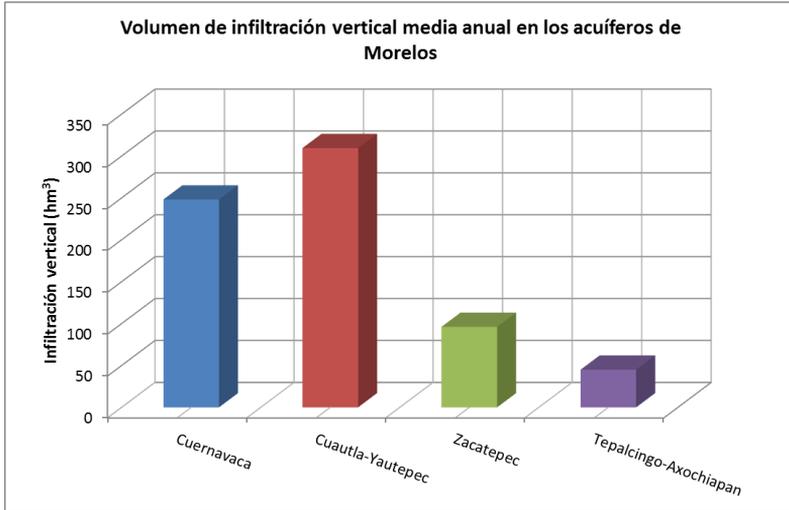


Figura 3.13. Volumen de infiltración vertical media anual en los acuíferos de Morelos

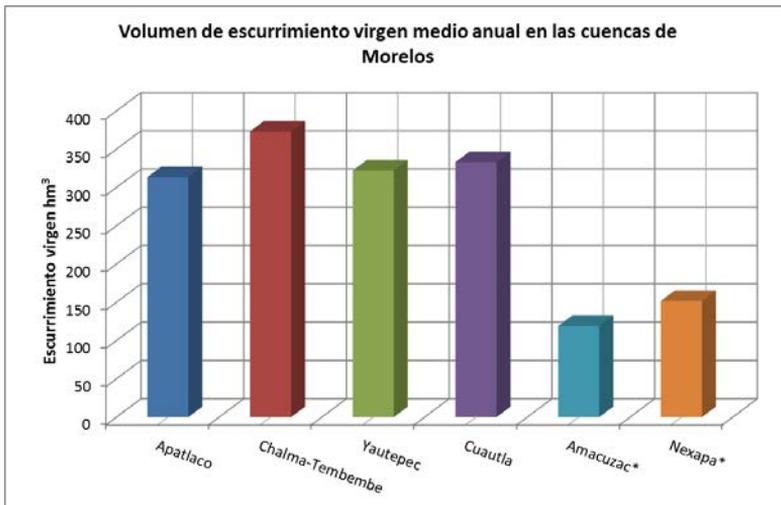


Figura 3.14. Volumen de escurrimiento virgen medio anual en las cuencas de Morelos. Nota: (*) Estimación de la superficie comprendida dentro del territorio del estado de Morelos.

Cálculo de disponibilidad actual de agua subterránea por el método AED

- Entradas

Considerando los volúmenes de infiltración vertical obtenidos en el balance hídrico y en adición a los datos de entradas registrados por la CNA (2002 a, b, c, d), se obtiene la recarga media anual de los acuíferos de Morelos, cuyas cantidades se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Volumen de entrada y recarga media anual de los acuíferos de Morelos

ENTRADAS en hm ³							
Acuífero	Superficie (km ²)	Infiltración vertical	Infiltración inducida por riego	Entradas horizontales	Recarga Inducida	Recarga Regional	Recarga media anual
Cuernavaca	994.00	248.11	22.50	0.00	12.00	0.00	282.61
Cuautla-Yautepec	2,700.00	309.44	45.00	0.00	11.86	0.00	366.30
Zacatepec	1,248.00	96.08	0.00	50.10	6.20	207.30	359.68
Tepalcingo-Axochiapan	670.51	44.94	8.29	0.00	2.90	0.00	56.13

Nota: Datos infiltración a partir de AED. Datos de otras variables, CONAGUA.

- Salidas

Partiendo de los datos publicados por el Organismo de Cuenca Balsas (2011) que actualiza la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPD), se tienen los volúmenes de los diferentes acuíferos registrados en la tabla 3.6, los cuales, a simple vista, son inconsistentes, ya que el balance resultante de disponibilidad de agua es positivo, cuando se reportan mayores volúmenes en salidas que en las entradas de agua subterránea.

Tabla 3.6. Volúmenes de salidas medias anuales (hm³) en los acuíferos de Morelos

SALIDAS en hm ³						
Acuífero	Superficie. (km ²)	Evaporación vasos	Descargas naturales de manantiales	Extracción por bombeo	Salidas horizontales	Suma
Cuernavaca	994.00	0.00	175.20	201.45	39.30	415.95
Cuautla-Yautepec	2,700.00	0.00	214.46	88.07	22.61	325.14
Zacatepec	1,248.00	8.90	310.90	41.39	10.00	371.19
Tepalcingo-Axochiapan	670.51	0.00	5.30	37.50	6.10	48.90

Fuente: CONAGUA-REPD, 2011.

- Disponibilidad

Con los datos de entradas y salidas puede calcularse directamente cuál es la disponibilidad de agua. En la tabla 3.7 y figura 3.15 se muestran los resultados obtenidos cuando se consideran en la variable infiltración vertical, los datos por el método de análisis espacial distribuido. Estos resultados muestran un enorme déficit en la disponibilidad de agua en el acuífero de Cuernavaca con un valor de -133.34 hm^3 . El acuífero de Zacatepec también está en déficit de disponibilidad de agua (-11.51 hm^3). Por su parte, los acuíferos de Cuautla-Yautepec y de Tepalcingo-Axochiapan presentan disponibilidades positivas de agua.

Tabla 3.7. Disponibilidad de agua subterránea estimada por método de análisis espacial distribuido

DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA			
Acuífero	Entradas (hm^3)	Salidas (hm^3)	Disponibilidad (hm^3)
Cuernavaca	282.61	415.95	-133.34
Cuautla-Yautepec	366.3	325.14	41.16
Zacatepec	359.68	371.19	-11.51
Tepalcingo-Axochiapan	56.13	48.9	7.23

De los datos anteriores se tiene que los acuíferos de Cuernavaca y Zacatepec se encuentran actualmente sobreexplotados, sobre todo el primero. En el caso del Acuífero Cuernavaca, extraoficialmente se estima que existe un excedente de aproximadamente 100 hm^3 debido a la subexplotación de los volúmenes concesionados. Si esto es así, el acuífero Cuernavaca puede encontrarse en una situación de progresivo abatimiento. En la tabla 7 se muestran los datos obtenidos y su representación gráfica (Figura 3.15).

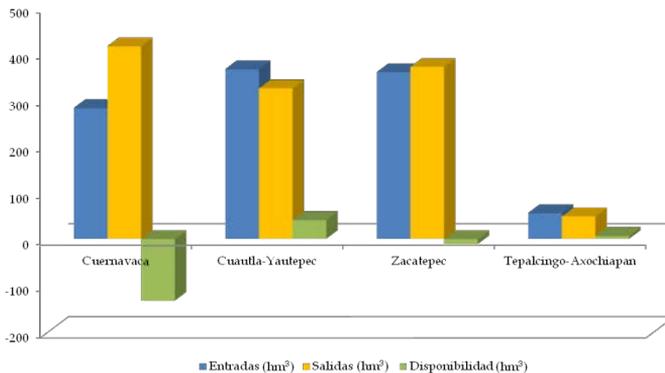


Figura 3.15. Disponibilidad de agua subterránea estimada por método de análisis espacial distribuido

Por otra parte, en su informe sobre disponibilidad de agua subterránea, el Organismo de Cuenca Balsas (CONAGUA, 2011) reporta datos de disponibilidad totalmente contrastantes con los aquí obtenidos. En la tabla 3.8 y figura 3.16 se muestran los valores de disponibilidad calculados por dicho organismo para los años 2003, 2009, 2010 y 2011, así como los calculados por el método AED ya mencionado y la diferencia entre ambas cuantificaciones.

Según los datos oficiales (hasta el año 2011), de continuar con la tendencia actual de extracción de agua subterránea, la condición de sobreexplotación de los acuíferos de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec se presentaría en: 4.7, 4.9 y 4.5 años, respectivamente, a partir del año 2011. Obviamente, en el caso del acuífero Tepalcingo-Axochiapan, la línea de sobreexplotación ha sido rebasada desde hace más de ocho años.

Cabe recordar que todos los cálculos se basan en la NOM-011-CNA-2000, que considera sólo los volúmenes concesionados y con registro en el Registro Público de Derechos de Agua para la Explotación.

Para explicar el origen de las grandes diferencias de los resultados mostrados en la Tabla 3.8, se puede decir que el gran déficit de disponibilidad de agua de -138.15 hm^3 en el acuífero Cuernavaca podría deberse a que existen explotaciones no registradas en el REPDA o, bien, en las concesiones autorizadas se extraen mayores volúmenes de los permitidos, o, también, que las estimaciones oficiales en la recarga no sean reales.

Tabla 3.8. Variación de la disponibilidad de agua subterránea (hm^3) reportada por la autoridad en el período 2002-2011

Acuífero	Publicado 31/01/2003	Publicado 28/08/09	REPDA 30/09/2010	Dictaminado técnicamente 2011	Cálculo AED	Diferencia Conagua 2011-AED
Cuernavaca	32.75	21.31	18.35	4.81	-133.34	-138.15
Cuautla-Yautepec	14.76	7.11	7.23	1.77	41.16	39.39
Zacatepec	27.04	20.01	16.81	4.37	11.51	7.14
Tepalcingo-Axochiapan	-2.14	-3.28	-5.10	-5.10	7.23	12.33
Total:	72.41	45.14	37.29	5.85	-73.44	-79.29

Fuente: CONAGUA-REPDA 2011. Volumen de agua subterránea asignada para uso público urbano y disponibilidad

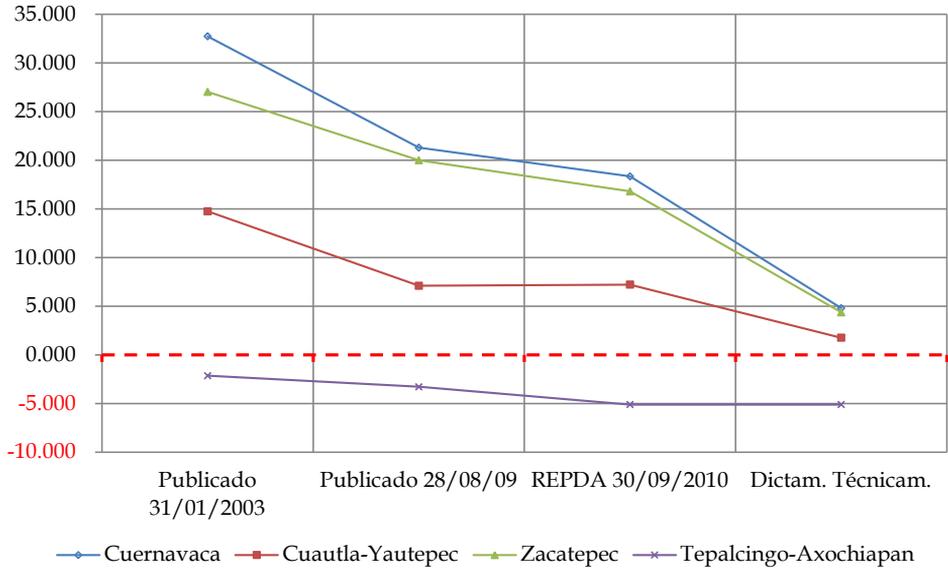


Figura 3.16. Variación de la disponibilidad de agua subterránea (hm³) asignada para uso público urbano y disponibilidad de acuerdo a fuentes oficiales. (Organismo de Cuenca Balsas, 2011).

Por otra parte, para los demás acuíferos distintos al de Cuernavaca, el cálculo basado en AED muestra disponibilidades mayores para todos los casos. Merece especial atención el acuífero Tepalcingo-Axochiapan que ha sido catalogado en déficit en todos los cálculos de CONAGUA de 2003 a 2011. Esta zona es de las más marginadas de Morelos y debido a tal “déficit de disponibilidad” no se autorizan aprovechamientos, no obstante, que de acuerdo a nuestros resultados existe una disponibilidad de 7.23 hm³. Es posible que los valores deficitarios reportados por la CONAGUA estén inducidos por la poca cantidad y distribución de pozos en la zona, que al ser pocos y concentrados en un área reducida marcan fuertes abatimientos de los niveles freáticos de los sitios de medición, pero que a nivel de acuífero no ha sido detectado que existe una disponibilidad mayor de agua.

Puesto que los grandes volúmenes de agua faltantes detectados en el presente estudio sólo pueden resolverse y verificarse a través de un adecuado registro de los volúmenes del agua realmente extraídos, que es competencia de la autoridad, no se ahondará en esta materia hasta que la autoridad publique, actualice y valide sus resultados.

Como una conclusión preliminar puede afirmarse que cualquier cálculo de disponibilidad de agua estará subestimado en un alto porcentaje debido a la

incertidumbre en el cálculo de las entradas de los acuíferos y a la insuficiencia de información de los volúmenes de extracción.

Disponibilidad de agua en el estado de Morelos en escenarios de cambio climático

Para realizar los cálculos de disponibilidad de agua en escenarios de cambio climático, con datos cuyas fuentes sean comparables, se empleará como dato de entrada a partir de los siguientes capítulos la disponibilidad publicada oficialmente por la CONAGUA (2011), conocida como disponibilidad dictaminada técnicamente (Tabla 3.8). Por tal razón, los resultados que se presentan a continuación representan un escenario muy conservador ya que el déficit de disponibilidad de agua del acuífero Cuernavaca, que así se calcule, estará subestimado ya que no se considerará el faltante de 138 hm³ determinado en el presente estudio.

Independientemente de las metodologías para determinar la disponibilidad de agua, para conocer el efecto del cambio climático en la misma es necesario que se realicen todos los cálculos de balance hídrico, modificando los valores de las variables primarias de entrada de las ecuaciones en aquellos parámetros que cambian por efecto de cambio climático, como lo son la temperatura y la precipitación.

De acuerdo con los resultados de los escenarios de cambio climático en el estado de Morelos, los efectos más importantes resultaron ser en la precipitación y en la temperatura. En las tablas 3.9 y 3.10 se muestran las anomalías de estas variables para los escenarios A1B y A2 de cambio climático para las décadas 2020, 2050 y 2080.

Tabla 3.9. Escenarios A1B y A2 de cambio de temperatura media anual (°C) para 2020, 2050 y 2080 en el estado de Morelos

TEMPERATURA (°C)	ESCENARIO A1B			ESCENARIO A2		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Anomalía (TAS)	0.9	1.8	2.6	0.9	1.7	3
Dispersión (IQR)	0.4	0.6	0.7	0.4	0.5	0.8
Rango de cambio (±)	0.5	1.2	1.9	0.5	1.2	2.2
	1.3	2.4	3.3	1.3	2.2	3.8

Tabla 3.10. Escenarios A1B y A2 de cambio en la precipitación anual (%) para 2020, 2050 y 2080 en el estado de Morelos

PRECIPITACIÓN (%)	ESCENARIO A1B			ESCENARIO A2		
	2020	2050	2080	2020	2050	2080
Anomalía (EPO)	-3.2	-3.1	-3.1	-5.6	-7	-8.8
Dispersión (IPO)	11	12	11	10.8	10.2	12
Rango de cambio (±)	-14	-15	-14	-16.4	-17.1	-20.8
	8	9	8	5.2	3.2	3.2

Para calcular el efecto del cambio climático en cada escenario y período en la estimación de la disponibilidad futura de agua, se aplicaron los porcentajes de variación de las anomalías precipitación y de magnitud de la anomalía de temperatura a aquellas variables primarias de la ecuación del balance hídrico que contuvieran a dichos parámetros, particularmente los términos de precipitación y evapotranspiración. Esto es evidente en el cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y Mather (1957) que tiene como datos de entrada precisamente a la precipitación y a la temperatura, que indudablemente modificarán el resultado de aquel parámetro. En consecuencia, los valores de variables derivadas como el excedente de agua, la infiltración y el escurrimiento, también se verán modificados.

Disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos de Morelos en el escenario A1B de cambio climático

Tomando como referencia los volúmenes de infiltración vertical calculados mediante AED para las condiciones de precipitación y temperatura actuales (Tabla 3.4), se recalcularon los valores de infiltración a partir de la introducción de las anomalías de temperatura y de precipitación en el escenario A1B a los datos actuales, de tal manera que se obtuvieron nuevos valores de infiltración vertical, estimada para las décadas del 2020, 2050 y 2080 en el escenario referido. Con los datos proyectados para cada período estimado, se calcularon los porcentajes de variación con respecto al valor de infiltración actual estimado. Los resultados se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11. Volúmenes de infiltración vertical (hm³) y porcentajes de variación en las zonas acuíferas de Morelos, bajo el escenario A1B para las décadas 2020, 2050 y 2080

Acuífero	Actual	2020	%	2050	%	2080	%
Cuernavaca	248.11	256.16	3%	257.91	4%	252.62	2%
Cuatla-Yautepec	309.44	270.58	-13%	270.77	-12%	262.55	-15%
Zacatepec	96.08	78.24	-19%	78.56	-18%	74.23	-23%
Tepalcingo-Axcochiapan	44.94	41.08	-9%	41.13	-8%	39.96	-11%
Total	698.57	646.05	-8%	648.37	-7%	629.37	-10%

Observando los datos del volumen de infiltración vertical en el escenario de cambio climático A1B, destaca la tendencia ligeramente positiva (3%) en la zona del acuífero Cuernavaca, lo cual coincide con los datos de mayor precipitación registrados históricamente para la zona norte del estado. Con respecto al resto de los acuíferos de Morelos, se obtuvieron decrementos significativos de infiltración vertical, sobre todo en el acuífero de Zacatepec (-19% a -23%), seguido del de Cuautla- Yautepec (-13% a -15%) en las proyecciones para las décadas de 2020 y 2080, respectivamente.

Para obtener la disponibilidad de aguas subterráneas en escenarios de cambio climático, se aplicó la variación únicamente a la variable infiltración, dejando sin cambio los valores de recarga y extracción publicados por la CONAGUA para el 2011. De lo anterior se obtuvo la disponibilidad por acuífero bajo el escenario A1B durante las climatologías de décadas de 2020, 2050 y 2080 (Tabla 3.12, Figura 3.17).

Se observa que únicamente en el acuífero Cuernavaca se proyectan números positivos con respecto a la disponibilidad de agua en este escenario para los diferentes años, mientras que en los tres acuíferos restantes del estado los números son negativos, mostrando un claro déficit en la disponibilidad de agua futura. Los resultados para la totalidad de los acuíferos muestran valores muy altos de déficit que van desde -99.55 hm³ hasta -125.89 hm³ para las décadas de los años 2020 y 2080, respectivamente.

Tabla 3.12. Disponibilidad futura de agua subterránea (hm³), escenario A1B y tasa actual de extracción anual

Acuífero	Actual (Conagua, 2011)	Escenario A1B		
		2020	2050	2080
Cuernavaca	4.81	16.66	20.61	12.71
Cuautla-Yautepec	1.77	-39.73	-36.53	-46.11
Zacatepec	4.37	-67.45	-63.67	-82.57
Tepalcingo-Axochiapan	-5.10	-9.04	-8.60	-9.92
Total:	5.85	-99.55	-88.19	-125.89

(*)Reportado por CONAGUA (2011).

Al observar las proyecciones de la disponibilidad de agua en escenarios de cambio climático, se concluye la urgente toma de medidas, entre las que se encuentra en primer término la reducción de la extracción de agua subterránea de los acuíferos de Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan según los volúmenes obtenidos de disponibilidad para cada período de años y conservar así, los acuíferos en equilibrio.

Para el caso del Acuífero Cuernavaca, los déficits de disponibilidad serían negativos si a los resultados calculados para las décadas futuras se les agregara el déficit de -138.15 hm³ obtenido por el método AED. Los nuevos valores de disponibilidad serían entonces

de -121.49 (década 2020), -117.34 (década 2050) y -125.44 (década 2080). Estas estimaciones coinciden con las apreciaciones prácticas de conocedores del tema del agua en Morelos, que ubican en el orden 100 hm³ los volúmenes extraídos sin conocimiento de la autoridad.

Disponibilidad de agua subterránea en los acuíferos de Morelos en el escenario A2 de cambio climático

Siguiendo la misma metodología descrita en el inciso precedente se calcularon los volúmenes de infiltración vertical y disponibilidad de agua subterránea para el escenario A2. Los resultados se muestran en las tablas 3.13 y 3.14 y figura 3.18.

Tabla 3.13. Volúmenes de infiltración vertical (hm³), en las zonas acuíferas de Morelos, en el escenario A2 para las décadas 2020, 2050 y 2080

Acuífero	Actual	2020	%	2050	%	2080	%
Cuernavaca	248.11	231.21	-7%	228.86	-8%	222.38	-10%
Cuautla-Yautepec	309.44	229.03	-26%	228.19	-26%	215.20	-30%
Zacatepec	96.08	61.90	-36%	61.44	-36%	55.22	-43%
Tepalcingo-Axcochiapan	44.94	33.76	-25%	33.55	-25%	31.06	-31%
Total:	698.57	555.90	-20%	552.04	-21%	523.87	-25%

Tabla 3.14. Disponibilidad futura de agua subterránea (hm³), escenario A2 y tasa actual de extracción anual

Acuífero	Actual (Conagua, 2011)	Escenario A2		
		2020	2050	2080
Cuernavaca	4.81	-22.84	-26.79	-34.69
Cuautla-Yautepec	1.77	-81.22	-81.22	-93.99
Zacatepec	4.37	-131.71	-131.71	-158.17
Tepalcingo-Axcochiapan	-5.10	-16.05	-16.05	-16.05
Total:	5.85	-251.82	-255.77	-302.90

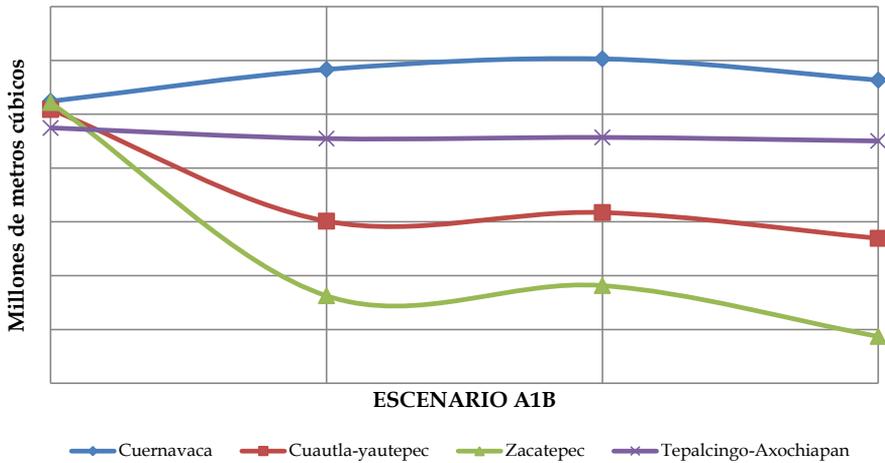


Figura 3.17. Variación de la disponibilidad de agua subterránea en el escenario A1B, según volúmenes de extracción actuales

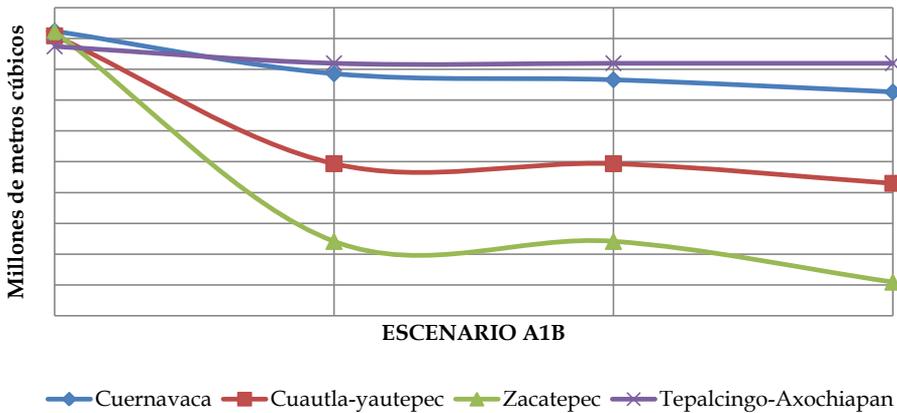


Figura 3.18. Variación de la disponibilidad de agua subterránea por acuífero en el escenario A2, según volúmenes de extracción actuales

Bajo las condiciones climáticas del escenario A2 se presentan invariablemente decrementos en la infiltración vertical por la disminución media mensual en la precipitación y el aumento en la temperatura media mensual. La zona acuífera menos vulnerable al cambio climático es la del acuífero Cuernavaca; sin embargo, se proyecta

un déficit de 7% en el volumen de infiltración vertical de este acuífero desde el año 2020 (Tabla 3.13). En los otros acuíferos se proyectan déficits mayores, los cuales se reflejan en condiciones muy adversas de disponibilidad de agua en este escenario de cambio climático. El déficit total de disponibilidad de agua para la década 2080 de todo el estado se estimó en 302.9 hm³ (Tabla 3.14).

Cabe destacar que dentro de las variables de cambio, no han sido considerados el cambio en el uso del suelo, la deforestación, el crecimiento demográfico ni eventos extraordinarios. Tampoco se consideró el resultado deficitario para el acuífero Cuernavaca de 138.15 hm³, que ya se discutió. En la figura 3.18 se observa el fuerte decremento en la disponibilidad del agua subterránea y la urgencia de realizar significativos ajustes en el manejo del agua para restaurar y buscar el equilibrio de los acuíferos morelenses.

Vulnerabilidad del recurso hídrico en el estado de Morelos ante el cambio climático

Entendiendo la vulnerabilidad como el grado de exposición o fragilidad de un sistema ante una amenaza, en el presente estudio se ha definido como sistema a la unidad hidrogeológica acuífera, la cual, a su vez, contiene diferentes subsistemas, tales como: áreas de recarga (áreas de captación y bosques) y descarga (caudales base de cuencas hidrográficas y manantiales), almacenamiento de agua subterránea, ecosistemas diversos, subcuencas y microcuencas hidrológicas, asentamientos humanos y zonas de desarrollo económico que comprenden áreas agrícolas, agropecuarias e industriales. De lo anterior se desprende que cualquier alteración que sufra la zona acuífera impactará sobre los múltiples subsistemas que comprenden la diversidad físico-biológica de su territorio.

Considerando que una de las principales amenazas actuales que gravitan sobre el sistema acuífero es el cambio climático, particularmente por el decremento de la precipitación y el aumento de la temperatura cuyas variaciones inciden directamente en el balance de agua, se presenta a continuación una metodología de cálculo de la vulnerabilidad de los recursos hídricos ante los efectos del cambio climático.

Para cada una de las zonas acuíferas de Morelos se han considerado cinco indicadores de vulnerabilidad cuya suma ponderada define lo que aquí se ha denominado "Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico" (IVRH). Los indicadores que lo conforman provienen de valoraciones objetivas y de datos numéricos que pueden ser obtenidos de fuentes gubernamentales y del presente trabajo.

Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (IVRH)

El IVRH se ha conceptualizado como elemento cuantitativo que permite conocer los componentes de peligro que pudieran afectar la disponibilidad de agua en un entorno de cambio climático.

Para la conformación del índice se han incluido factores que tienen que ver con la cantidad de agua excedente, la cantidad disponible, los efectos de presión por demanda del recurso disponible, el tamaño de la cobertura de dotación de agua potable a la población (ligada estrechamente con la infraestructura hidráulica disponible), y la calidad de la misma. Este conjunto de factores pueden ser cuantificados de diversas maneras, todas ellas documentables, cuantificables y rastreables.

El IVRH está integrado por un conjunto de indicadores que permiten cuantificar cada uno de los factores mencionados en el párrafo precedente. Estos son: Indicador de Excedente de Agua (Ex), Indicador de Disponibilidad de Agua (Di), Indicador de Población (Po), Indicador de Cobertura en la Dotación de Agua (Da), e Indicador de Calidad del Agua (ICA).

Se han asignado factores de peso a cada indicador en función de su aportación para la evaluación de la vulnerabilidad del recurso hídrico. Todos los indicadores están normalizados de cero a uno, y la suma de todos ellos constituye el Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (IVRH). En la Tabla 3.15 se enlistan estos indicadores y sus factores de peso.

Tabla 3.15. Indicadores de vulnerabilidad de disponibilidad de agua en entorno al cambio climático y sus factores de peso

Indicador	Peso	Símbolo
Excedente (mm)	0.50	Ex
Disponibilidad (hm ³)	0.20	Di
Población (% estado)	0.10	Po
Dotación de agua (% población)	0.05	Da
Calidad ICA	0.15	ICA

Puesto que la suma de los indicadores da como resultado cinco, por razones de claridad se han multiplicado por dos para dejar el índice final con valores de cero a diez, que es como se reportará finalmente. La ecuación se define a continuación:

$$\text{IVRH} = (0.5 * \text{Ex} + 0.2 * \text{Di} + 0.1 * \text{Po} + 0.05 * \text{Da} + 0.15 * \text{ICA}) * 2$$

A continuación se describen cada uno de los indicadores que conforman al IVRH, así como la proveniencia de la información y los datos que conforman a cada uno de los mismos.

Indicador de Agua Excedente (Ex)

A partir del balance hídrico se ha calculado la lámina promedio anual de agua (en mm) que resta después de considerar la evapotranspiración real. Dicho índice refleja directamente los cambios en la precipitación y temperatura que se proyectaron para cada escenario climático y, por su importancia, se le asigna un peso del 50% de los índices considerados. En la tabla 3.16 se muestran los valores de excedente de agua calculados para los acuíferos en los distintos escenarios de cambio climático, y en la tabla 3.17 se muestran los valores correspondientes al indicador, de acuerdo a los rangos de variación del excedente de agua. Adicionalmente, se muestra el mapa de excedente de agua para toda la región (Figura 3.19). Nótese la importancia del excedente de agua en la región norte del estado, donde alcanza sus valores máximos, coincidiendo con las zonas de la Sierra de Chichinautzin y Lagunas de Zempoala.

Tabla 3.16. Agua excedente, calculada a partir de balance hídrico por modelación de Análisis Espacial Distribuido en escenarios de cambio climático

ACTUAL			
Acuífero	EXCEDENTE (mm)		
Cuautla-Yautepec	327.86		
Tepalcingo-Axochiapan	309.74		
Cuernavaca	658.59		
Zacatepec	235.98		
Escenario A1B			
Acuífero	EXCEDENTE (mm)		
	2020	2050	2080
Cuautla-Yautepec	277.14	269.54	216.76
Tepalcingo-Axochiapan	296.62	300.64	224.09
Cuernavaca	659.23	668.67	567.73
Zacatepec	207.44	194.72	143.33
Escenario A2			
Acuífero	EXCEDENTE (mm)		
	2020	2050	2080
Cuautla-Yautepec	226.01	230.96	212.90
Tepalcingo-Axochiapan	234.08	242.22	223.85
Cuernavaca	569.78	587.94	564.35
Zacatepec	154.53	160.12	138.01

Tabla 3.17. Indicador de Agua Excedente

Indicador de Agua Excedente (mm)		
Rango (mm)	Calificación	Valor
0-200	Muy Bajo	1.00-0.81
201-400	Bajo	0.80-0.61
401-600	Medio	0.60-0.41
601-800	Alto	0.40-0.21
801-1000	Muy alto	0.20-0.00

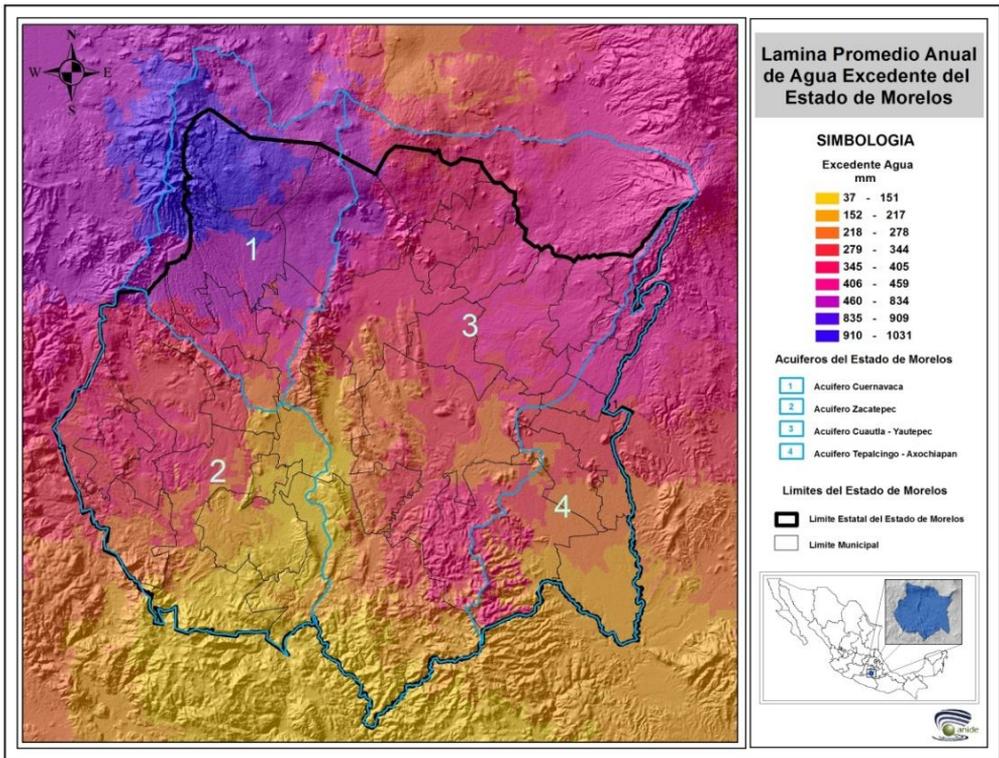


Figura 3.19. Distribución de agua excedente en el estado de Morelos

Indicador de Disponibilidad de Agua en el acuífero (Di)

Este indicador se estima a través del porcentaje que se obtiene al dividir las entradas menos las salidas (volumen disponible), entre el volumen de entrada; según el balance de aguas subterráneas elaborado por el Organismo de Cuenca Balsas (publicado el 31

de marzo de 2011) el resultado obtenido representa la disponibilidad del acuífero en por ciento. El factor de peso para este indicador se ha estimado en 20% y los valores asignados se muestran en las tablas 3.18 y 3.19 en la que aparecen los valores de disponibilidad de agua subterránea en escenarios de cambio climático, de acuerdo con el rango de valores posibles.

Tabla 3.18. Disponibilidad de agua subterránea en los escenarios A1B y A2 (hm³)

Acuífero	Actual (*)	Escenario A1B		
		20	50	80
Cuernavaca	4.81	16.66	20.61	12.71
Cuautla-Yautepec	1.77	-39.73	-36.53	-46.11
Zacatepec	4.37	-67.45	-63.67	-82.57
Tepalcingo-Axochiapan	-5.1	-9.04	-8.6	-9.92
Total:	5.85	-99.55	-88.19	-125.89
Acuífero	Actual (*)	Escenario A2		
		20	50	80
Cuernavaca	4.81	-22.84	-26.79	-34.69
Cuautla-Yautepec	1.77	-81.22	-81.22	-93.99
Zacatepec	4.37	-131.71	-131.71	-158.17
Tepalcingo-Axochiapan	-5.1	-16.05	-16.05	-16.05
Total:	5.85	-251.82	-255.77	-302.9

(*) Nota: La disponibilidad actual se ha tomado del Dictamen Técnico CONAGUA, 2011.

Tabla 3.19. Indicador de Disponibilidad de agua

Indicador de Disponibilidad agua (%)		
Rango (%)	Calificación	Valor
20 - <0	Nula	1.00-0.81
1-20	Baja	0.80-0.61
21-40	Media	0.60-0.41
41-60	Alta	0.40-0.21
61-80	Muy alta	0.20-0.00

Indicador de Población (Po)

La distribución espacial y dinámica poblacional en cada zona acuífera es otro de los indicadores que se ha considerado para estimar la vulnerabilidad, ya que de esto depende el grado de presión sobre el recurso (Figura 3.20). Para tal fin se establecieron

los porcentajes del número de habitantes con respecto al total del estado en cada zona acuífera, calificándose de acuerdo con lo establecido en las tablas 3.20 y 3.21.

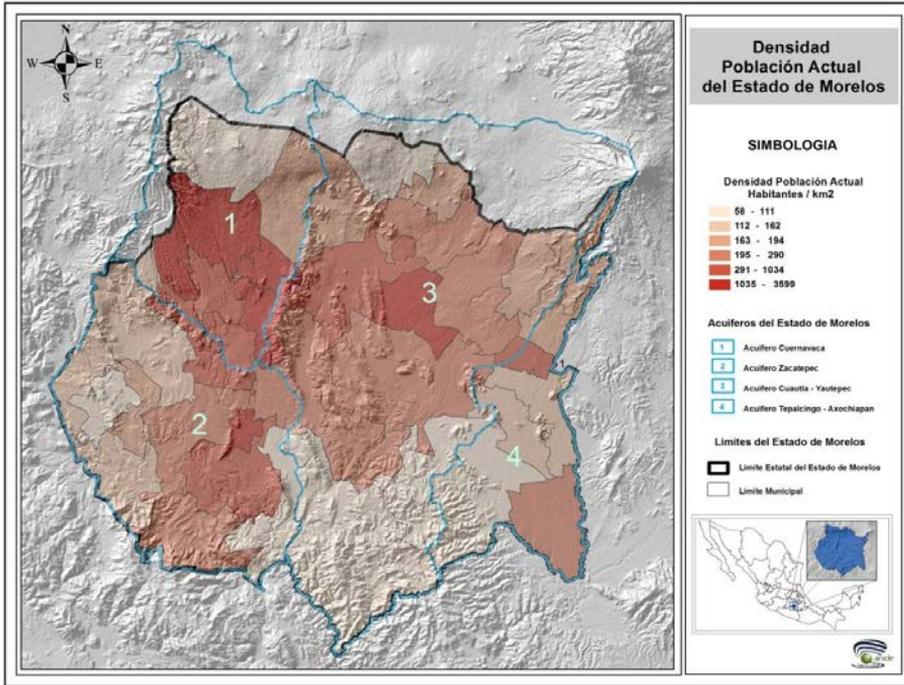


Figura 3.20. Densidad de población (hab/km²) en el estado de Morelos

Los datos procesados se obtuvieron a partir del Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI. Cabe aclarar que para los diferentes escenarios, dichos porcentajes se mantuvieron constantes. El peso asignado en este caso es del 10%.

Tabla 3.20. Porcentaje de población por acuífero

Acuífero	Porcentaje
Acuífero Cuernavaca	42%
Acuífero Cautla-Yautepec	36%
Acuífero Zacatepec	15%
Acuífero Tepalcingo-Axochiapan	8%
Suma:	100%

Tabla 3.21. Indicador de Población

Indicador de Población (% del estado)		
Rango (%)	Calificación	Valor
81.0-100	Muy alta	0.81-1.00
61.0-80.0	Alta	0.61-0.80
41.0-60.0	Media	0.41-0.60
21.0-40.0	Baja	0.21-0.40
0.0-20.0	Muy baja	0.00 -0.20

Indicador de Cobertura en la Dotación de Agua Potable (Da)

En este indicador se considera implícito el desarrollo de infraestructura en cada región acuífera, para lo cual se consultaron los datos recopilados por el INEGI en el Censo de Población y Vivienda 2010, referidos al número de habitantes que cuentan con agua potable en su domicilio, ya sea dentro de su casa o en su terreno, y a partir de este número se obtuvo el porcentaje de cobertura con respecto al total de la población que se encuentra dentro de la zona del acuífero. El peso asignado en este caso fue del 5% y su estimación se muestra en la tabla 3.22. Por otro lado, en la tabla 3.23 se muestra en indicador de dotación de agua potable a la población:

Tabla 3.22. Porcentaje de cobertura de dotación de agua potable

Acuífero	Porcentaje
Acuífero Zacatepec	89%
Acuífero Cuernavaca	84%
AcuíferoTtepalcingo-Axochiapan	71%
Acuífero Cuautla-Yautepec	72%

Tabla 3.23. Indicador de Dotación de Agua Potable a la Población

Dotación de agua (% población)		
Rango (%)	Calificación	Valor
0-20	Muy deficiente	1.00-0.81
21-40	Deficiente	0.81-0.61
41-60	Media	0.60-0.41
61-80	Alta	0.40-0.21
81-100	Muy alta	0.20-0.00

Indicador de Calidad del Agua

Considerando que la calidad del agua superficial es un indicador importante para establecer la vulnerabilidad del recurso dentro de la zona acuífera, se partió del Indicador de Calidad del Agua (ICA) establecido por la CONAGUA para cada subcuenca del estado. En este caso los valores permanecen constantes en el cálculo para cada escenario, ya que se desconoce la futura eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales. Los valores asignados son los propuestos por Brown y McClelland (1973) cuya escala va de 1 (pésima) a 100 (excelente). El peso asignado en este indicador fue del 15%.

Puesto que a nivel de acuífero no se dispone del valor del Indicador de Calidad de Agua, pero sí del de las cuencas, se ha tomado este el valor del indicador de cada cuenca como el del acuífero que la misma contiene. En las Tablas 3.24 y 3.25 se muestran los indicadores de calidad de agua de las cuencas incidentes en el estado de Morelos y las zonas acuíferas a las que se les aplicará dicho indicador.

Tabla 3.24. Indicador de calidad de agua por cuenca y acuífero

Indicador de calidad de agua		
Cuenca	Zona acuífera	ICA (CNA)
Apatlaco	Cuernavaca	48
Cuautla-Yautepec	Cuautla-Yautepec	64
Chalma-Amacuzac	Zacatepec	70
Amatzinac	Tepalcingo-Axochiapan	55

Tabla 3.25. Indicador de Calidad del agua

Calidad ICA		
Rango ICA	Calificación	Valor
0-25	Pésima	1.00-0.81
26-50	Mala	0.81-0.61
51-70	Regular	0.60-0.41
71-90	Buena	0.40-0.21
91-100	Excelente	0.20-0.00

Presentación del Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (IVRH) en Morelos en el contexto de cambio climático

Hasta el presente punto se tiene conformado un IVRH por el efecto conjugado de cinco indicadores. Durante el diseño de los indicadores se escogieron escalas de valores de dominio entre cero y uno, de tal manera que los valores cercanos a cero correspondan a

poco o ningún efecto de tal indicador sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico, mientras que los valores cercanos a la unidad corresponderá a efectos severos sobre dicha vulnerabilidad.

Ahora, de acuerdo con la ecuación del IVRH el valor máximo que puede tomar el índice es de 10 unidades, valor que significa una vulnerabilidad muy alta, mientras que los valores cercanos a cero señalarán bajas vulnerabilidades. En la tabla 3.26 se muestran los valores posibles del IVRH.

Tabla 3.26. Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (IVRH) ante escenarios de cambio climático

Índice de Vulnerabilidad	
Muy alta	8.1-10.0
Alta	6.1-8.0
Media	4.1-6.0
Baja	2.1-4.0
Muy Baja	0.0-2.0

Aplicando los valores de entrada de los datos que conforman a cada indicador y ponderados por los factores de peso que ya se describieron, en la tabla 3.27 se muestran los valores de entrada (extraídos de los diversos incisos del presente estudio) que alimentan a cada indicador en lo particular. Los valores de entrada se han seleccionado dentro del contexto de cambio climático en las variables en donde aplica. A partir de dicha tabla y asignando los valores de peso ya discutidos, se calcularon los índices de vulnerabilidad de los cuatro acuíferos de Morelos en el contexto de cambio climático (Tabla 3.28). El rango de valores corresponde con los mostrados en las tablas 3.29 y 3.30.

De los resultados anteriores se concluye que el acuífero Cuernavaca presenta una vulnerabilidad media en el escenario A1B, con valores entre 4.89 y 4.52, (décadas 2020 a 2080) que se incrementan ligeramente en el escenario A2 con valores de entre 5.43 y 5.45 en las décadas 2020 a 2080, respectivamente. Por su parte, los acuíferos de Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan, presentan vulnerabilidades altas con valores de 6.36 en el escenario A1B (década del 2020), que se incrementan a valores de hasta 6.98 en el escenario A2 (década del 2080) (Tabla 3.31 y Figura 3.21).

Tabla 3.27. Valores de entrada para el cálculo de los indicadores de vulnerabilidad

ACUÍFERO CUERNAVACA	Indicador	Peso	Escenario						
			Actual	A1B			A2		
				2020	2050	2080	2020	2050	2080
	Excedente (mm)	0.50	658.6	659.2	668.7	567.7	569.8	587.9	564.4
	Disponibilidad (hm ³)	0.20	4.8	16.7	20.6	12.7	-22.8	-26.8	-34.7
	Población (% estado)	0.10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Cobertura agua (% población)	0.05	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
	Calidad ICA	0.15	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
ACUÍFERO CUAUTLA-YAUTEPEC	Indicador	Peso	Escenario						
			Actual	A1B			A2		
				2020	2050	2080	2020	2050	2080
	Excedente (mm)	0.50	327.9	277.1	269.5	216.8	226.0	231.0	212.9
	Disponibilidad (hm ³)	0.20	1.8	-39.7	-36.5	-46.1	-81.2	-81.2	-94.0
	Población (% estado)	0.10	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	Cobertura agua (% población)	0.05	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Calidad ICA	0.15	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0	64.0
ACUÍFERO ZACATEPEC	Indicador	Peso	Escenario						
			Actual	A1B			A2		
				2020	2050	2080	2020	2050	2080
	Excedente (mm)	0.50	236.0	207.4	194.7	143.3	154.5	160.1	138.0
	Disponibilidad (hm ³)	0.20	4.4	-67.5	-63.7	-82.6	-131.7	-131.7	-158.2
	Población (% estado)	0.10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Cobertura agua (% población)	0.05	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Calidad ICA	0.15	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
ACUÍFERO TEPALCINGO- AXOCHIAPAN	Indicador	Peso	Escenario						
			Actual	A1B			A2		
				2020	2050	2080	2020	2050	2080
	Excedente (mm)	0.50	309.7	296.6	300.6	224.1	234.1	242.2	223.9
	Disponibilidad (hm ³)	0.20	-5.1	-9.0	-8.6	-9.9	-16.1	-16.1	-16.1
	Población (% estado)	0.10	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Cobertura agua (% población)	0.05	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
	Calidad ICA	0.15	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0	55.0

Tabla 3.28. Índice de Vulnerabilidad actual (2011) y proyección a futuro de los acuíferos del estado de Morelos ante el cambio climático

Escenario climático	Acuífero			
	Cuernavaca	Cuautla-Yautepec	Zacatepec	Tepalcingo-Axochiapan
Actual	4.89	6.36	6.38	6.35
A1B	20	4.88	6.65	6.61
	50	4.52	6.69	6.58
	80	5.18	6.96	6.93
A2	20	5.43	6.91	6.88
	50	5.34	6.88	6.85
	80	5.45	6.97	6.96

Tabla 3.29. Valores de vulnerabilidad actual y en escenario A1B

Acuífero	Actual (Conagua, 2011)	Escenario A1B		
		2020	2050	2080
Cuernavaca	4.81	16.66	20.61	12.71
Cuautla-Yautepec	1.77	-39.73	-36.53	-46.11
Zacatepec	4.37	-67.45	-63.67	-82.57
Tepalcingo-Axochiapan	-5.10	-9.04	-8.60	-9.92
Total:	5.85	-99.55	-88.19	-125.89

Tabla 3.30. Valores de vulnerabilidad actual y en escenario A2

Acuífero	Actual (Conagua, 2011)	Escenario A2		
		2020	2050	2080
Cuernavaca	4.81	-22.84	-26.79	-34.69
Cuautla-Yautepec	1.77	-81.22	-81.22	-93.99
Zacatepec	4.37	-131.71	-131.71	-158.17
Tepalcingo-Axochiapan	-5.10	-16.05	-16.05	-16.05
Total:	5.85	-251.82	-255.77	-302.90

Tabla 3.31. Vulnerabilidades de los acuíferos de Morelos en diferentes escenarios y en los años 2020, 2050 y 2080

Escenario climático		Acuífero			
		Cuernavaca	Cuatla-Yautepec	Zacatepec	Tepalcingo-Axochiapan
A1B	20	Vulnerabilidad Media (4.1 -6.0)	Vulnerabilidad Alta (6.1-8.0)		
	50				
	80				
A2	20				
	50				
	80				

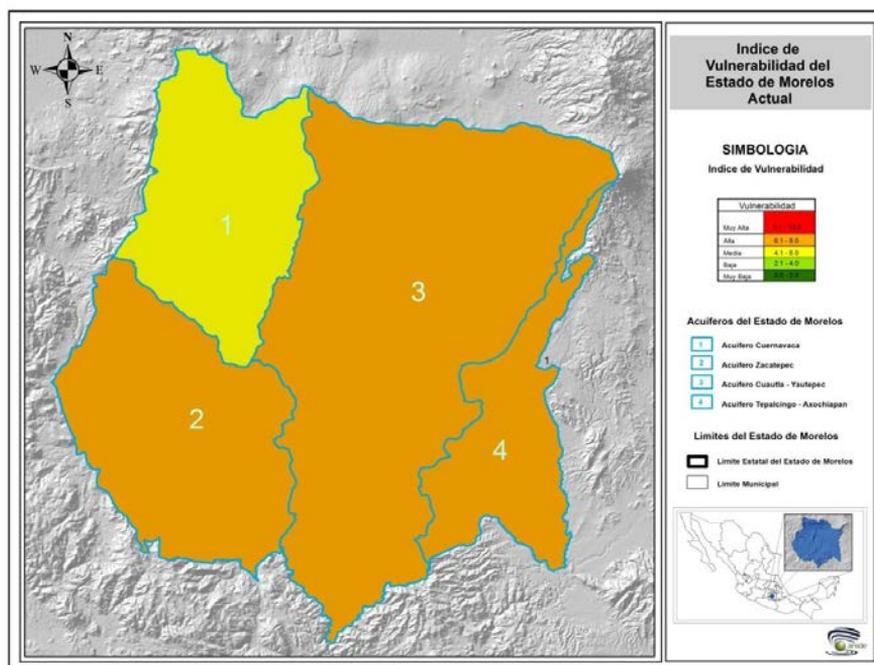


Figura 3.21. Vulnerabilidad actual (2011) de los acuíferos del estado de Morelos en entorno de cambio climático

Conclusiones

1. El método de análisis espacial distribuido (AED) permite conocer las variaciones de los valores de los parámetros de la ecuación de balance hídrico a escala de celdas, permitiendo un análisis detallado de los componentes de biofísicos, climáticos e hídricos de una cuenca.
2. La ecuación de balance hídrico incluye parámetros que son afectados por las variaciones de temperatura y de precipitación en entornos de cambio climático (CC). Los parámetros afectados por CC son: precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración.
3. Para el estado de Morelos las proyecciones de variación de precipitación y temperatura en modelos de cambio climático, son a la disminución de la lluvia y el incremento de las temperaturas.
4. A escala del acuífero, se estimaron las variaciones de los parámetros climáticos a mayor detalle, permitiendo calcular los efectos de CC a esta escala utilizando el método de AED.
5. La disponibilidad de agua subterránea actual dictaminada técnicamente por la CONAGUA en 2011 en los cuatro acuíferos del estado de Morelos es: a) acuífero Cuernavaca (4.81 hm³); b) acuífero Cuautla-Yautepec (1.77 hm³); c) acuífero Zacatepec (4.37 hm³); y d) acuíferos Tepalcingo-Axochiapan (-5.1 hm³). En este mismo contexto, a nivel de todo el estado, según reporta la CONAGUA, la disponibilidad de agua subterránea es de 5.85 hm³.
6. Los cálculos por AED muestran un déficit de agua total de -79.29 hm³, lo que contrasta fuertemente con las cifras de disponibilidad publicadas. La metodología de cálculo de disponibilidad considera a aquellos aprovechamientos legalmente registrados por la autoridad, lo que podría explicar la magnitud del uso no registrado del agua.
7. Como una conclusión preliminar puede afirmarse que cualquier cálculo de disponibilidad de agua estará subestimada en un alto porcentaje debido a la incertidumbre en el cálculo de las entradas de los acuíferos y a la insuficiencia de información de los volúmenes de extracción.
8. No obstante, se calcularon los valores de disponibilidad de agua en los escenarios de cambio climático A1B y A2 para las décadas 2020, 2050 y 2080, utilizando los datos de disponibilidad actual reportada por la autoridad (CONAGUA, 2011).
9. El acuífero Cuernavaca presenta una disponibilidad de agua con tendencia positiva, debido a que localmente las proyecciones de cambio climático son de incremento de la precipitación, contrario a lo proyectado para los demás acuíferos.
10. Se diseñó el Índice de Vulnerabilidad del Recurso Hídrico (IVRH) en el que se incluyeron factores que tienen que ver con la cantidad de agua excedente, la cantidad disponible, los efectos de presión por demanda del recurso disponible,

el tamaño de la cobertura de dotación de agua potable a la población (ligada estrechamente con la infraestructura hidráulica disponible), y la calidad de la misma. Este conjunto de factores pueden ser cuantificados de diversas maneras fuentes, todas ellas documentables, cuantificables y rastreables.

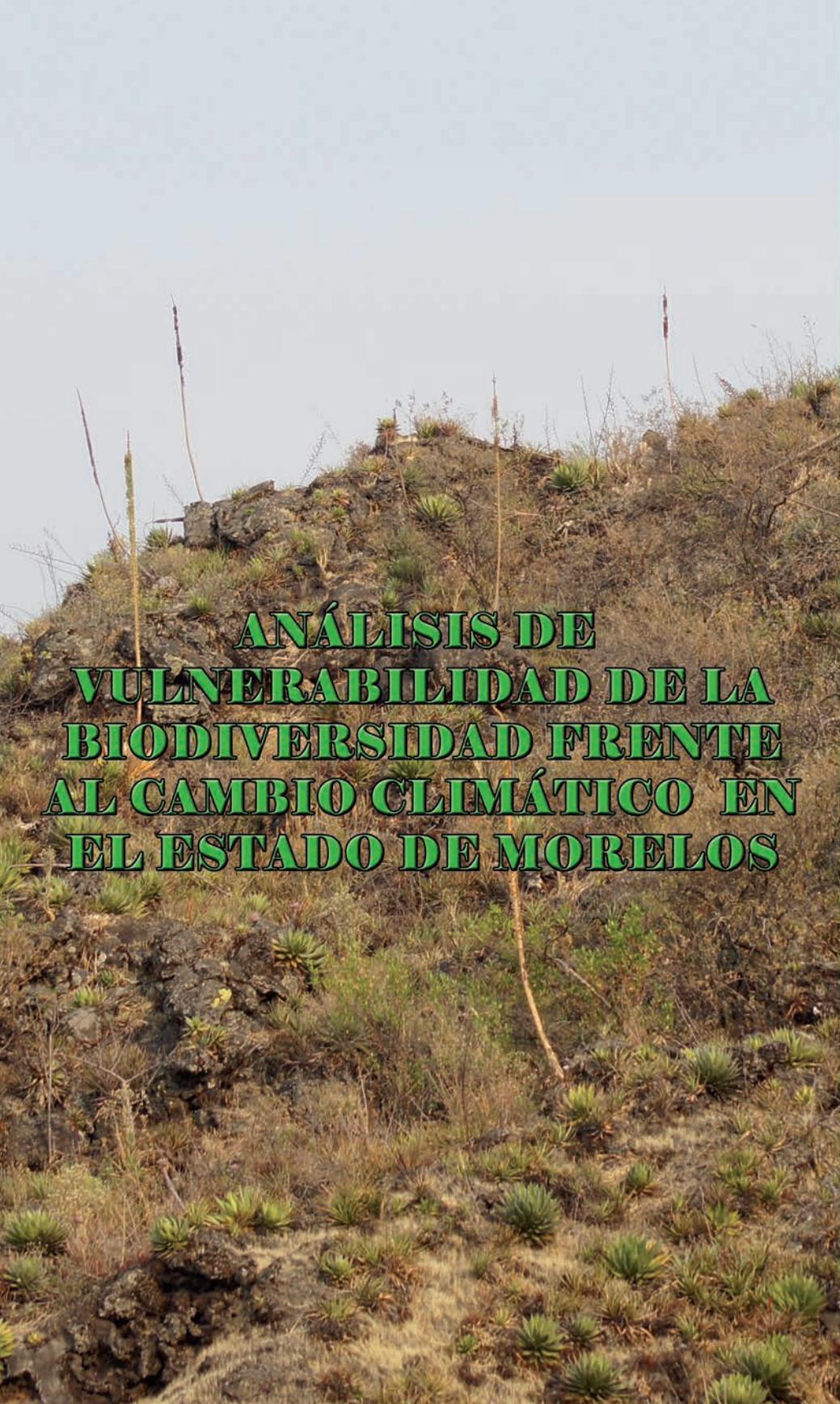
11. Los resultados del IVHR para los acuíferos de Morelos en la época actual (2011) y sus proyecciones en entorno al cambio climático muestran que tres acuíferos de Morelos (Cuautla-Yautepec, Zacatepec y Tepalcingo-Axochiapan) se encuentran en Alta Vulnerabilidad en cuanto a la disponibilidad de agua en escenarios de cambio climático y uno, el de Cuernavaca, se encuentra con una vulnerabilidad media.
12. Se requiere implementar medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad del recurso hídrico en Morelos.
13. La disponibilidad del recurso hídrico en Morelos depende, principalmente, de los ecosistemas que ocupan la parte norte de su territorio, entendiendo éstos como el conjunto de condiciones geográficas, climáticas, geológicas y bióticas que intervienen en el ciclo hidrológico. Actualmente se ejerce presión sobre áreas destinadas a la conservación y protección ambiental, viéndose a diario sometidas a la tala indiscriminada, invasión, explotación de especies e incendios. Tal es el caso de la Sierra Chichináutzin, la reserva estatal El Texcal, el área natural protegida Sierra de Montenegro, el bosque de la zona norte de Cuernavaca, entre otras.
14. Se considera que la realización y aplicación del Ordenamiento Ecológico del Territorio con un enfoque de Cuenca es una medida fundamental de adaptación.

Referencias bibliográficas

- Bologaro-Crevenna R. A., Sierra O. R., Torres R. V., Márquez G. A. Z., Ramírez V. J. D., Uribe N. S., Castillo H. F. J. J., Lagunas G. R., Suarez T. F., Sotelo P. N. Y., Velasco V. B. y Monsalvo J. C. B. (2006). Análisis de la Vulnerabilidad y Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en los Sectores más relevantes del Estado de Morelos. Instituto Nacional de Ecología. 181 pp.
- Brooks K., Ffolliott P. F., Gregersen H.M. y Thamnes J.L. (1992). Hydrology and the management of watersheds. Iowa: Iowa University Press/AMES. Iowa, EEUU.
- Brown R. y McClelland N. (1973). Water Quality Index. Application In The Kansas River Basin. US-EPA Report, EPA Region VII. 76 pp.
- CEAMA, Comisión Estatal de Agua y Medio Ambiente. (2009). Programa hídrico del estado de Morelos 2007-2012.
- Chow V. T. (1964). Handbook of Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York, EEUU.
- Chow V. T., Maidmen R. D. y Mays W. L. (1988). Applied Hydrology. McGraw-Hill International Editions. 572 pp.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2002). "El agua en el estado de Morelos", Gerencia Regional Balsas subgerencia regional técnica, Cuernavaca, México.

- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2002a). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero de Cuernavaca, estado de Morelos.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2002b). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Cuautla-Yautepec, estado de Morelos.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2002c). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zacatepec, estado de Morelos.
- CNA, Comisión Nacional del Agua. (2002d). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Valle de Tepalcingo-Axochiapan, estado de Morelos.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2009). Estado de los acuíferos de Morelos. Organismo de Cuenca Balsas, Dirección Técnica.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2010). Programa hídrico Visión 2030 del Estado de Morelos. Organismo de Cuenca Balsas, Dirección Técnica.
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2011). Organismo de cuenca Balsas. Volumen de agua subterránea asignada para uso público urbano y disponibilidad.
- CONAGUA-REPDA, Comisión Nacional del Agua-Registro Público de Derechos de Agua. (2011). Actualización de bases de datos del (REPDA). Organismo de Cuenca Balsas.
- Cortés S. A. y Vázquez S. (1991) Frontera hidrogeológica entre la cuenca de México y los valles del estado de Morelos, en: U. Oswald et al. (1991). El recurso hídrico en Morelos, UNAM/CRIM, Cuernavaca, México, pp. 59-91.
- Dunne T. y Leopold L. B. (1978). Water in Environmental Planning. San Francisco: W.H. Freeman and Company.
- INEGI. (2010). Censo general de población y vivienda. México. Consultado en: <http://www.censo2010.org.mx/>.
- Jaimes-Palomera R. y Cortés S. A. (1991). Hidrogeología de las cuencas de los ríos Aplataco y Yautepec, región noroccidental del estado de Morelos, en: Oswald et al., el recurso hídrico en Morelos UNAM-CRIM, pp. 93-117.
- Maidment D. R. (1993) "GIS and Hydrology Modeling". In M.F. Goodchild, B.O. Parks, and L.T. Steyaert, editors. Environmental Modeling with GIS. Oxford University Press. New York, EEUU. 488 pp.
- Maidment D. R. (1996). "GIS and Hydrologic Modeling-an Assessment of Progress", In Proceedings Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, Santa Barbara, CA, NCGIA. http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD-ROM/main.html.
- Meijerink. A.M.J., H.A.M. de Brouwer, C.M. Mannaerts y C.R. Valenzuela. (1994). Introduction to the use of Geographics Information Hydrology. UNESCO. International Hydrology Programme and ITC Publication No. 23, Enschede, The Netherlands. 243 pp.
- NOM-011-CNA-2000. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua- Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. México, 17 de abril de 2002.

- Olivera F. (1996). Spatial distributed modeling of storm runoff and non-point source pollution using geographic information systems, PhD Thesis University of Texas at Austin.
- Olsson L. y Pilesjö P. (1999). "Development and applications of spatially distributed hydrological models in a GIS environment", In ITC Short Course of Environmental Modelling. <http://www.natgeo.lu.se/lennartweb>.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). (1981). Plan Nacional Hidráulico 1981. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). (1989). Plan Nacional Hidráulico 1981. Comisión del Plan Nacional Hidráulico. México.
- Thornthwaite C. W. y Mather J. R. (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance.
- USDA. (1986). Urban Hydrology for small Watersheds, Conservation Engineering Division Technical Release 55.



**ANÁLISIS DE
VULNERABILIDAD DE LA
BIODIVERSIDAD FRENTE
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL ESTADO DE MORELOS**

4

CAPÍTULO

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA BIODIVERSIDAD FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS

Ramón Pérez Gil Salcido^{4,5*}
Victor Hugo Flores-Armillas*
Alejandro Guevara-Martínez*
Inés Arroyo Quiroz*
Miguel Ángel Linaje Espinosa^{5**}
Patricia Illoldi Rangel**

Introducción

Efectos del Cambio Climático

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, el aumento en número y extensión de lagos glaciares debido a los cambios en la nieve y los terrenos congelados y el aumento en el promedio mundial del nivel del mar. Con un grado de confianza alto, las proyecciones indican que, hacia mediados del siglo, la escorrentía fluvial anual y la disponibilidad de agua aumentarán en latitudes altas (y en ciertas áreas lluviosas tropicales) y disminuirán en algunas regiones secas en latitudes medias y en los trópicos, así como numerosas áreas semiáridas experimentarán una disminución de sus recursos hídricos. Como consecuencia, el cambio climático, sin duda, tendrá un profundo efecto en la vida, entorno, salud y seguridad de la especie humana (Gitay *et al.*, 2002; IPCC, 2007; UICN, 2009).

Entre los sistemas humanos sensibles al cambio climático se incluyen muchos recursos hídricos como son: agricultura y silvicultura; zonas costeras y sistemas marinos; asentamientos humanos, energía, e industria; seguros y otros servicios financieros y salud humana. La vulnerabilidad de estos sistemas variará en función del lugar geográfico, del tiempo y de las condiciones sociales, económicas y ambientales a las que se enfrenten (IPCC, 2001). Para América Latina los impactos varían en todo el continente pero esta región del planeta es especialmente vulnerable al fenómeno llamado "El Niño". Las sequías más severas que se han producido en México en los últimos decenios han tenido lugar durante los años de El Niño, y el Brasil meridional y

^{4*}Investigadores de *FAUNAM, A.C. Sede Morelos

^{5*}Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica. Instituto de Biología, UNAM

el noroeste del Perú han mostrado condiciones de humedad anómalas. Los ciclones tropicales junto con fuertes lluvias, crecidas y deslizamientos de tierras son muy comunes en América Central y México meridional por lo que se considera que si aumentara El Niño, América Latina estaría expuesta a estas condiciones con más frecuencia (IPCC, 2001, 2007). En el caso particular de México, el riesgo frente a los efectos del cambio climático fue analizado en el marco del llamado Estudio de País (CONABIO, 2009), en el cual se menciona que la temperatura podría aumentar de 3° a 4°C en el noroeste, reduciéndose ligeramente hacia el sur-sureste, donde el incremento sería de poco más de 2°C. Debido a que más de la mitad del territorio mexicano se localiza en una latitud subtropical caracterizada por la presencia de zonas áridas y semiáridas, así como de selva húmeda y que cerca del 80% de los suelos del país registran algún grado de erosión, con el cambio climático la desertización continuaría avanzando a tasas más aceleradas.

En cuanto a la agricultura, en especial la de temporal, México sufriría pérdidas cuantiosas a causa de la mayor frecuencia de sequías, y el área con potencial de producción de granos básicos se reduciría en forma considerable. La producción de maíz de temporal en México se vería afectada de manera negativa, pues la proporción del territorio nacional no apto para este cultivo —con base en los requerimientos óptimos de temperatura y precipitación— pasaría de 59.6% actual a 75.0%. Entre 8.4% y 22.0% sería moderadamente apta y sólo entre 2.5% y 15.9% sería apta (Ojeda *et al.*, 1997; Flores *et al.*, 2003). La precipitación podría ser más intensa o, por el contrario, reducirse en toda la República pero en todo caso, las implicaciones de estas diferencias, en términos de la vulnerabilidad, serían negativas, por lo que el abasto de agua para riego y para consumo humano se vería afectado.

Entre las cuencas afectadas, resalta la del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago que se considera la más vulnerable (Ojeda *et al.*, 1997; Magaña *et al.*, 1999; Maderey y Jiménez, 2000). Los asentamientos humanos estarían muy expuestos en los estados con rápido crecimiento poblacional, gran consumo de agua y en los que se registran altos niveles de incidencia de enfermedades infecciosas, en particular en la región del norte (Tamaulipas y Chihuahua), en la zona del centro (Jalisco y México) y en el Golfo de México (Tabasco) (Aguilar, 2000).

La vulnerabilidad ante el cambio climático

La definición de vulnerabilidad se refiere al grado de susceptibilidad o de incapacidad de un sistema para afrontar los efectos adversos del cambio climático, y en particular la variabilidad del clima y los fenómenos extremos; la vulnerabilidad dependerá del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático a que esté expuesto un sistema, y de su sensibilidad y capacidad de adaptación (IPCC, 2006, 2007 en UICN, 2012; DOF, 2012). La definición se puede aplicar tanto a un sistema ecológico como a uno

socioeconómico y tiene tres componentes: la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación (Martínez-Alonso *et al.*, 2010; McCarthy *et al.*, 2001). Factores de exposición son, por ejemplo, los cambios en el clima y la variabilidad climática, el aumento en los niveles de CO₂ en la atmósfera, el aumento del nivel del mar y otros factores no relacionados con el cambio climático (por ejemplo, factores de origen antropogénico) (Martínez-Alonso *et al.*, 2010). La exposición es el grado en el cual un sistema se ve afectado (de manera negativa o positiva) por estímulos externos y sin que haya adaptación autónoma de éste; la sensibilidad puede inducir cambios en la productividad y crecimiento de árboles, en la distribución de especies, en las condiciones del suelo, en la estructura del ecosistema y en los regímenes de perturbaciones (incendios y plagas) (Martínez-Alonso *et al.*, 2010); finalmente, la capacidad de adaptación al cambio climático se refiere a las medidas y ajustes en sistemas humanos o naturales como respuesta a estímulos climáticos (INE, 2010a, 2010b; Oyhantçabal, 2010; Verbtuggen *et al.*, 2011; DOF, 2012). La vulnerabilidad de un ecosistema depende también de su capacidad adaptativa. La capacidad adaptativa de los ecosistemas depende de la capacidad adaptativa de las especies, la diversidad de grupos funcionales y la diversidad de especies dentro de los grupos funcionales (Walker, 1992, 1995; Peterson y Holling 1998).

Efectos del cambio climático sobre la biodiversidad

El calentamiento global actual está provocando cambios en los regímenes climáticos que ya están repercutiendo en diferentes aspectos de la biodiversidad (McAllister, 1991; Gitay *et al.*, 2002). En las próximas décadas, el impacto del cambio climático se verá reflejado en modificaciones en la composición y funcionamiento de los ecosistemas. Los aumentos de temperatura y cambios en el ciclo hidrológico tendrán como resultado un aumento en la tasa de pérdida de hábitat, y tarde o temprano influirán en la extinción de especies (CONANP, 2010; Glick *et al.*, 2011).

Los sistemas naturales pueden ser especialmente vulnerables al cambio climático, dada su limitada capacidad de adaptación, y algunos de estos sistemas pueden sufrir daños significativos e irreversibles. Se espera que el cambio climático incremente los peligros actuales de extinción de algunas especies más vulnerables y que la amplitud geográfica de sus daños, así como el número de sistemas afectados aumente con la magnitud y la rapidez misma del cambio climático. Se ha previsto un efecto en cascada o dominó, es decir, una acción que iniciará una cadena de eventos que culminarán en un indeseable evento posterior, sin establecer o cuantificar las contingencias relevantes (IPCC, 2001, 2007). Los cambios a nivel de especie pueden afectar directamente las funciones de los organismos (por ejemplo, el crecimiento y comportamiento) y modificar las características poblacionales (por ejemplo, el tamaño y estructura). Estos cambios pueden, a su vez, producir pérdidas en otras especies y un efecto en cascada sobre la

biodiversidad y la apertura del sistema a invasiones de especies no autóctonas y, por ende, una mayor alteración (Gitay *et al.*, 2002).

A continuación se presentan de manera sucinta los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad:

1. Cambios en características poblacionales, tamaño y estructura
2. Desplazamientos hacia mayores altitudes de poblaciones de plantas y animales
3. Alargamiento de las estaciones de crecimiento
4. Florecimiento temprano de algunas especies de flora
5. Emergencia explosiva de poblaciones de insectos, depredadores, plaga e invasoras
6. Cambios temporales en puesta de huevos de algunas especies de aves
7. Contracción en el área de distribución
8. Desapariciones locales
9. Sinergia con factores de *stress* presentes, como contaminantes
10. Cambios en comportamiento
11. Fragmentación de áreas de distribución
12. Ampliación del área de distribución
13. Alteración a movimientos migratorios latitudinales, cambios en fechas/áreas
14. Alteración a movimientos migratorios altitudinales, cambios en fechas/áreas
15. Cambio en estructura y función ecosistémica (por ejemplo, desacoplamiento o descomposición de ciclos de nutrientes, flujos del agua, interacciones de las especies, distribución dentro de los paisajes)
16. A nivel ecosistema, que se rebasen los umbrales de riesgo crítico de los ecosistemas, donde el rango de tolerancia depende de la vulnerabilidad de cada sistema
17. Inundaciones más agudas, más frecuentes
18. Sequías más agudas, más frecuentes
19. Incendios incontrolados
20. Alteración de especies dependientes de “disparadores ambientales específicos” indispensables para la migración, la reproducción, la puesta de huevos, la germinación de semillas, la floración, la hibernación, la aparición de primavera, etc.
21. Alteración de dependencia a relaciones interespecificas o vínculos ecológicos (por ejemplo, presas, depredadores, forraje, parásitos, plantas hospederas, etcétera)

Aunque sólo un número limitado de especies se enfrentará a condiciones totalmente inadecuadas para su persistencia, otras experimentarán una drástica reducción y fragmentación de áreas de distribución o, en caso contrario, ampliación de su distribución, promoviendo la creación de nuevas comunidades naturales con propiedades desconocidas. De hecho, algunos investigadores han argumentado que en estas reorganizaciones de las comunidades se producen fuertes efectos distributivos que extienden la duración de los efectos directos del cambio climático sobre la distribución de las especies (Peterson *et al.*, 2002). Además, si las especies o las poblaciones se

encuentran amenazadas, se espera que el riesgo aumente por la sinergia entre el cambio climático y el cambio en el uso de suelo que fragmenta los hábitats y promueve la construcción de obstáculos en la migración de las especies, así como por la persistencia de muchos impactos negativos sobre los ecosistemas y sus especies de origen antropogénico. Dando como resultado que estas presiones lleven a que algunas especies actualmente clasificadas como “en peligro de extinción crítico” se extingan, y a que la mayoría de las denominadas “amenazadas” o “vulnerables” sean más escasas y se acerquen a su extinción en el siglo XXI. En este sentido se espera que aproximadamente el 30% de las especies de plantas y animales estén al borde de la extinción, incluso hay quienes aseguran que hasta un 25% de las especies de plantas y animales podrían ser llevadas a la extinción por el cambio climático global para el año 2050 (UICN, 2009; Turner *et al.*, 2009). En América Latina, por ejemplo, cabe esperar que los impactos del cambio climático disminuyan las poblaciones de ranas y pequeños mamíferos en América Central (IPCC, 2001, 2007).

Entre las características que hacen a las especies más susceptibles (sensibles) al cambio climático se pueden mencionar (IPCC, 2001; Martínez-Meyer *et al.*, 2004; Foden *et al.*, 2008; Glick *et al.*, 2011; Walther *et al.*, 2002): a) Especialización del hábitat y/o a requerimientos de microhábitat. Es más probable que las especies con hábitat generalizado o con requerimientos de hábitat no especializados toleren mayores niveles en el cambio climático y en el ecosistema, más que especies especializadas; b) Tolerancias ambientales cercanas o umbrales que sea posible exceder debido al cambio climático (particularmente por pulsos extremos) en cualquier estadio en su ciclo de vida; c) Dependencia de “disparadores ambientales específicos” o señales que pueden ser interrumpidos o variar por el cambio climático. Muchas especies dependen de dichos factores ambientales como la aparición de la primavera y una serie de otros procesos esenciales como señales para la migración, la floración, la reproducción, la puesta de huevos, la germinación de semillas, la hibernación, etcétera; d) Dependencia a relaciones interespecíficas o vínculos ecológicos que sea posible que se interrumpan o cambien debido al cambio climático. Algunas de estas relaciones pueden ser: presas, depredadores, forraje, parásitos, plantas hospederas, entre otros; e) Pobre habilidad de dispersión o colonización a nuevos rangos apropiados; f) Que ocupen espacios pequeños y con bajas densidades de población; g) Que los hábitats de las especies ya estén demasiado fragmentados a lo largo de su distribución; h) Que las especies estén expuestas a presiones del uso humano, como el cambio de uso de la tierra y la cobertura vegetal, que tengan algún valor económico; i) La estrategia reproductiva de las especies también pueden hacerlos sensibles al cambio climático. Algunos estudios sugieren que las especies con tiempos de generación largos y menos hijos son más propensos a tener un mayor riesgo de extinción por el cambio climático a largo plazo que aquellos cuya historia de vida se caracteriza por tiempos cortos de generación y muchos hijos; y, finalmente j) La existencia de otros factores de estrés tienen el potencial de exacerbar los efectos del cambio climático sobre los individuos y poblaciones. Por ejemplo, la

exposición a contaminantes tales como metales pesados, petróleo, pesticidas y otros contaminantes.

Ante la variabilidad y los cambios climáticos, como ocurre en otras latitudes, sólo algunas de las especies constitutivas de un ecosistema podrán adaptarse mediante la plasticidad fenotípica, la evolución adaptativa y la migración (Markham, 1996; Bawa y Dayanandan, 1998; Pitelka, 1997; Kirilenko *et al.*, 2000).

Efectos del cambio climático en el estado de Morelos

Para Morelos, los modelos producidos por Bolongaro-Crevenna *et al.* (2012) indican una variabilidad del régimen de lluvias en las diferentes zonas del Estado, encontrando una disminución en la precipitación anual total en el sur, un ligero aumento en los valles centrales y una tendencia a aumentar en las regiones altas del centro y el noroeste; por otro lado, se proyectan aumentos continuos de la temperatura mínima y máxima del aire desde 0.5° hasta 4°C. En el caso de la precipitación, las proyecciones analizadas muestran tendencias a la disminución de las lluvias. Si bien hay proyecciones que prevén variaciones climáticas como las señaladas, Morelos es un estado relativamente pequeño e inserto en cuencas atmosféricas de mayores dimensiones cuyo comportamiento final frente a la variabilidad pronosticada es aún incierta.

El presente estudio tiene como objetivo general evaluar la vulnerabilidad y riesgo actual y futuro de la biodiversidad del estado de Morelos ante la variabilidad y los efectos del cambio climático en términos de modificación del régimen de precipitación y el aumento de la temperatura. En particular, este estudio analiza la vulnerabilidad de especies prioritarias frente al cambio climático. El análisis se realiza contra varios escenarios y abiertamente con un alcance limitado reconociendo las enormes restricciones en términos de compatibilidad de escalas y ausencia de información tanto micro climática y prospectiva fiable como ecológica y biológica a nivel de especie. El presente estudio constituye tan sólo una parte de un esfuerzo coordinado por la UAEM en el que participan varias organizaciones y que busca integrar de forma completa y concisa la información en torno a la dimensión y naturaleza de los efectos del cambio climático global sobre el estado de Morelos.

Antecedentes

En México se han llevado a cabo estudios previos de diversa índole que incorporan el tema de cambio climático y biodiversidad; se han realizado estudios biológicos sobre el papel que juegan las plantas como fuentes de emisión o secuestro de carbono (Maserá *et al.*, 1992; Segura, 1992; Bellón *et al.*, 1994); sobre la relación entre cambio climático, vegetación y áreas protegidas (Villers-Ruiz y Trejo-Vázquez, 1997, 1998 y 2000), y sobre fauna silvestre (Trejo *et al.*, 2011; Peterson *et al.*, 2002; Parra-Olea *et al.*, 2005; Ballesteros-

Barrera *et al.*, 2007). También se han llevado a cabo algunos estudios multidisciplinarios (Gay, 2000; Martínez y Fernández, 2004; Ojeda *et al.*, 1997; Conde, 2006), esfuerzos institucionales (SEMARNAT, 2009a, 2009b, 2009c y 2009d; CONABIO, 2009; CONANP, 2010), y programas estatales de acción ante el cambio climático para Puebla, Veracruz, Nuevo León, Guanajuato y Chiapas (Tejeda-Martínez y Conde, 2009).

Dentro de los estudios sobre cambio climático en el estado de Morelos, se ha elaborado el "Análisis de Vulnerabilidad y Capacidad de Adaptación al Cambio Climático" en los sectores, sistemas y regiones más vulnerables, con sus respectivas medidas y estrategias de adaptación (Bologaro *et al.*, 2006). Actualmente, se está desarrollando el "Programa de Acción ante el Cambio Climático" que permitirá identificar las principales fuentes emisoras de los gases de efecto invernadero y propondrá estrategias de mitigación y control para los mismos.

Metodología

Características ecológicas del estado de Morelos y su biodiversidad

El estado de Morelos debe sus características ecológicas a su peculiar ubicación geográfica, precisamente entre las zonas neártica y neotropical, la influencia del Eje Volcánico Transversal en su parte alta al Norte, y de la Cuenca del Balsas en su región más baja, al centro y sur de la entidad y a su gradiente altitudinal en dirección norte-sur (Aguilar, 1995; Contreras-McBeath *et al.*, 2006). Dichas particularidades le otorgan una gran diversidad ambiental y microclimática, la cual ha dado lugar al establecimiento de diferentes tipos de vegetación (Rzedowski, 1978): bosque de coníferas, bosque de encinos, bosque mesófilo de montaña, bosque tropical caducifolio, pastizal, zacatonal, bosque de galería y vegetación acuática (Bonilla-Barbosa *et al.*, 2000).

El estado de Morelos está dividido en tres regiones ecológicas: a) la región montañosa del norte (caracterizada por presentar una vegetación primaria de bosque templado, tanto de pino como de pino-encino y algunas asociaciones de latifoliadas); b) el valle intermontano (localizado en la parte central del estado y cuyos recursos naturales han sufrido un serio detrimento tanto cualitativo como cuantitativo dada la expansión de la frontera urbana y la contaminación en todos sus elementos, como suelo, agua y aire); y por último, c) la región montañosa del Sur (caracterizada por la presencia de una vegetación de selva baja caducifolia, que está todavía bien conservada en algunas partes) (Monroy y Colín, 1991; Contreras-McBeath *et al.*, 2004).

En cuanto a los ecosistemas acuáticos, en Morelos hay siete ríos principales que recorren la entidad de norte a sur, estos son los ríos Amacuzac, Tembembe, Tetlama, Apatlaco, Yautepec, Cuautla y Amatzinac. Los sistemas ribereños asociados a dichos cauces son especialmente complejos debido a las variaciones de la temperatura a lo largo de sus

respectivos recorridos, en función de la riqueza biótica específica en cada uno de ellos y en función también de la composición de las comunidades ícticas (Contreras-McBeath, 1995). Adicionalmente hay que considerar los cuerpos de agua permanentes, lagos y lagunas; en Morelos existen los caracterizados por aguas templadas (14-22°C) como Zempoala, Compila, Tonatiahua, Acoyotongo, Acomantla y Quila ubicados dentro del Parque Nacional Lagunas de Zempoala y la laguna de Hueyapan localizada en el área protegida de El Texcal. Existen también los lagos y lagunas de las regiones bajas, con aguas cálidas (22-32°C) como los lagos de Tequesquitengo, El Rodeo y Coatetelco. Finalmente, hay que mencionar la importancia que revisten los manantiales, de un valor enorme desde el punto de vista faunístico, ya que representan refugios de agua permanentes y de alta calidad para ciertas especies (Contreras-McBeath *et al.*, 2004).

En cuanto a su diversidad, dentro del territorio morelense se registra el 33% de las especies de aves, el 21% de las especies de mamíferos, el 14% de reptiles y el 10% de plantas vasculares reportadas para el país, por ello, se ubica en el lugar número 17 con respecto a otros estados en cuanto a riqueza de especies, y además se encuentra entre los nueve estados con elevado endemismo de flora (CONABIO, 1998; Contreras-McBeath *et al.*, 2004; Bonilla-Barbosa y Villaseñor, 2003).

Amenazas a la biodiversidad

Las principales amenazas que sufre la biodiversidad del estado de Morelos son: pérdida de la cubierta vegetal debido al cambio de uso de suelo (por ejemplo, en la expansión agropecuaria o la proliferación de asentamientos humanos o la construcción de obras civiles); erosión⁶ (hídrica y eólica); deforestación; incendios forestales; contaminación (del suelo, del aire y del agua); el comercio ilegal de vida silvestre (principalmente de orquídeas, cactáceas, helechos, musgos y aves canoras); el impacto ambiental hormiga; la presencia de especies ferales como parte del fenómeno de introducción de especies exóticas (por ejemplo, la acuacultura) (CONABIO, 1998; Pérez Gil *et al.*, 2010).

Elaboración y análisis de modelos de distribución potencial

En coordinación y con el apoyo del Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Instituto de Biología de la UNAM, se elaboraron modelos de nicho ecológico proyectados como distribuciones potenciales de una muestra representativa de especies de vertebrados (mamíferos, aves, anfibios y reptiles) presentes en el estado de Morelos. El modelado del nicho ecológico representa una herramienta para elaborar una superficie de respuesta, en términos probabilísticos, a partir de los datos de presencia de las especies, de parámetros climáticos, geológicos y de vegetación, con el objetivo de

⁶ De las 386 mil ha originales de selvas bajas que existían en 1975, éstas se redujeron a sólo 23 mil ha en 1980, es decir una disminución de 93% del área original.

identificar el hábitat donde una especie no ha sido registrada pero es probable que se encuentre. De la modelación de los nichos de las especies se obtienen los resultados sobre la distribución futura esperada.

El modelado de nicho ecológico, implementado con el paquete computacional MaxEnt,⁷ ha demostrado ser capaz de proveer predicciones acertadas, en donde cada celda da una referencia a valores acumulativos, representados como porcentaje del valor de probabilidad de cada celda (Phillips *et al.*, 2004). MaxEnt modela un nicho ecológico de “grano grueso” proyectado en una distribución potencial de la especie, el cual produce una solución única, en formato ascii, que puede ser importada a un Sistema de Información Geográfica (en este caso ArcGis 9.2) para representarse así en un mapa geográfico (Phillips *et al.*, 2004). Es importante mencionar que para los fines de este estudio, consideramos inconveniente emplear los modelos generados por la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANIDE) dada la resolución de celdas de 50 km² que resulta en una escala demasiado gruesa.⁸ En este caso recurrimos a otras fuentes de información que permitieran reconstruir las coberturas a una resolución más fina.

⁷ Existen varios métodos que pueden utilizarse para generar modelos de distribuciones potenciales de las especies (Guisan y Zimmermann, 2000; Elith *et al.*, 2006). En este caso se utilizó MaxEnt, ya que estudios recientes muestran que este método determina de una mejor forma las áreas de distribución potencial adecuadas, en comparación con otros métodos (Elith *et al.*, 2006; Phillips, 2008; Phillips *et al.*, 2004, 2006). MaxEnt hace predicciones usando sólo los datos de presencia de las especies. Este programa modela una distribución potencial del hábitat disponible en el área de estudio, la cual está en función de los datos ambientales (temperatura y precipitación) y de la distribución geográfica conocida de la especie en cuestión (latitud/longitud). La distribución potencial de una especie es aquella más cercana a la uniforme (es decir, la más cercana a tener probabilidades iguales de presencia a lo largo de toda el área de estudio) sujeta a la restricción de que la expectativa en la distribución modelada, para cada variable ambiental, debe concordar con su promedio empírico a lo largo de la distribución real conocida (Elith *et al.*, 2010). Por lo tanto, el valor calculado por MaxEnt no es de probabilidad de presencia, sino de “similitud del hábitat” conocido con el predicho. MaxEnt asigna un valor de idoneidad de hábitat por cada celda de la cuadrícula en el área de estudio, que va de 0 a 1, donde la celda con un valor de 1 presenta una similitud del hábitat conocida alta, mientras que aquellas celdas con valores cercanos a 0 presentan una similitud baja o nula. Para estimar la distribución potencial de las especies de estudio se utilizó MaxEnt versión 3.3.3k con los parámetros predefinidos (umbral de convergencia= 105, máximo número de iteraciones= 500, valor de regularización β = auto) (Phillips *et al.*, 2012).

⁸ La diferencia más importante con los modelos de ANIDE es el tamaño de celda de la información propuesta por ellos, por ejemplo, en el caso de las variables del IPCC se trata de celdas de 0.5 grados vs. 0.01. Si bien estamos de acuerdo con las propuestas de Magaña *et al.* (2011) acerca de la importancia de generar modelos climatológicos y coberturas de cambio climático a un nivel regional con mejores bases técnicas que las que se tienen del IPCC, existe un problema. Tanto las coberturas de Magaña *et al.* (2011) como las de ANIDE, son propuestas con celdas de 50km x 50km. Es una escala que no permite hacer evaluación alguna con respecto a cómo los fenómenos de cambio climático repercutirán en especies

Para obtener los modelos finales de distribución potencial actual y futura se corrieron los datos geográficos conocidos para las especies con 19 variables obtenidas de WorldClim 1.3 (<http://www.worldclim.org/>) (Hijmans *et al.*, 2005). Las variables climáticas para el futuro corresponden al Modelo de Circulación General (MCG) HADCM3, un modelo acoplado atmósfera-oceano desarrollado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research. Dichas coberturas incluyeron parámetros climáticos tales como precipitación anual media, precipitación diaria máxima y mínima, temperatura diaria máxima y mínima y temperatura media anual. Estas variables se utilizan ampliamente en estudios de modelado por considerarse biológicamente significativas para caracterizar distribuciones de especies, ya que representan tendencias anuales, estacionalidad y factores limitantes o extremos (Hijmans *et al.*, 2005). Los datos de ocurrencia (georreferenciados) se obtuvieron de colecciones científicas tanto nacionales como internacionales.

Se utilizó el escenario A2 (alta emisión) que considera altas concentraciones de CO₂ atmosférico (alta emisión) y un incremento en la temperatura que va de moderado a alto. Este escenario describe un panorama muy heterogéneo, caracterizado por la autosuficiencia, la conservación de las identidades locales y una población mundial en continuo crecimiento (Arnell *et al.*, 2004; IPCC, 2000). Esta región geográfica tiene un crecimiento poblacional que puede verse reflejado en un escenario de este tipo.

Los modelos de nicho ecológico de las especies de vertebrados seleccionadas fueron proyectados a las condiciones actuales y a los años 2020, 2050 y 2080, usando el escenario de cambio climático del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC)⁹ y el SRES A2 del Canadian Centre for Climate Modelling Analyst (CGCM2) (http://ipccddc.cru.uea.ac.uk/sres/cgcm2_download.html).

endémicas o microendémicas. Un modelo de nicho generado con las coberturas de ANIDE no permite sino decir en términos casi binarios (ausencia-presencia) lo que sucede con las especies sujetas a este estudio. El mayor nivel de resolución significa que la totalidad del estado de Morelos se encuentre contenido en seis píxeles.

⁹El IPCC desarrolló un nuevo grupo de modelos de escenarios de cambio climático, llamado Special Report on Emission Scenarios (SRES por sus siglas en inglés). Estos escenarios cubren una amplia gama de factores responsables de las futuras emisiones, que van desde aspectos demográficos (por ejemplo, crecimiento poblacional humano), hasta desarrollo tecnológico y económico (IPCC, 2000). Los escenarios SRES están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2) y exploran vías de desarrollo alternativas, incorporando toda una serie de fuerzas originantes demográficas, económicas y tecnológicas, junto con las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) resultantes. Los escenarios SRES no contemplan otras políticas climáticas además de las existentes. Se utilizan de manera considerable las proyecciones de emisión para conjeturar el cambio climático futuro, y sus supuestos básicos respecto de la evolución socioeconómica, demográfica y tecnológica son el punto de partida de numerosos estudios sobre la vulnerabilidad del cambio climático y evaluaciones de impacto (IPCC, 2007). En particular, el escenario A2 considera un crecimiento poblacional de quince billones de humanos para el año 2100, con un crecimiento económico y tecnológico modesto. El escenario proyecta emisiones de GEI un poco más bajas

Los métodos empleados para modelar la distribución de especies, considerando principalmente la información contenida en colecciones científicas, han sido diversos y van desde simplemente delimitar el contorno del área de distribución, hasta el uso de métodos estadísticos complejos. La utilidad del método de modelado debe ser, necesariamente, su poder predictivo en la distribución potencial de una especie (Stockwell y Peters, 1999; Sánchez-Cordero *et al.*, 2001, 2004; Soberón y Peterson, 2005). Un modelo ideal aprovecharía la extensa información contenida en las colecciones científicas y resolvería las desventajas que presentan otros métodos estadísticos. Recientemente, se ha desarrollado el uso de algoritmos de modelado de la distribución de especies, que brindan la opción de emplear la información contenida en las colecciones científicas, con la ventaja de un manejo más adecuado de los datos disponibles. Los sesgos, tanto geográficos como taxonómicos dentro de los inventarios biológicos, normalmente excluyen áreas en las cuales las especies están potencialmente presentes (Stockwell y Peters, 1999; Soberón y Peterson, 2005). Por esta razón, el modelado del nicho ecológico representa una buena alternativa dado que extrapolan a partir de parámetros climáticos, geológicos y de vegetación, así como de la ocurrencia conocida de las especies, con el objetivo de identificar el hábitat donde una especie no ha sido registrada pero es probable que ocurra. Esta aproximación, implementada en el paquete computacional MaxEnt, ha demostrado ser capaz de proveer predicciones acertadas, en donde cada celda da una referencia a valores acumulativos, representados como porcentaje del valor de probabilidad de cada celda (Phillips *et al.*, 2004). Este método se enfoca en modelar el nicho ecológico, basado en un concepto de nicho geográfico o de Grinnell, es decir, el espacio geográfico en el cual la especie es capaz de mantener poblaciones reproductivas *in situ*, sin depender de una inmigración recurrente (Grinnell, 1917; Hutchinson, 1957; MacArthur, 1972).

Por otra parte, si las condiciones climáticas sufren cambios importantes por efecto del calentamiento global, las poblaciones de las especies que habitan zonas con fuerte alteración tenderían a desaparecer de esos sitios. Igualmente, si los sitios que actualmente son inapropiados para una especie se vuelven adecuados por efecto del cambio climático, entonces es posible que las poblaciones de esa especie colonicen nuevas áreas. El resultado de estos procesos de extinción y colonización locales de las poblaciones se pone de manifiesto en cambios detectables de la distribución geográfica de las especies (Hansen *et al.*, 2001; Thomas y Lennon, 1999). El razonamiento ecológico de estos supuestos se sustenta en la hipótesis del conservadurismo del nicho ecológico, que se ha probado en diferentes grupos faunísticos en México y otras partes (Peterson *et al.*, 1999; Peterson y Holt, 2003); en teoría, una adaptación rápida a ambientes recién

a las consideradas en el escenario IS92, así como emisiones más bajas de aerosoles que la del modelo previo; esto resulta en una respuesta de calentamiento relativamente similar al escenario de IS92 (IPCC, 2001).

transformados es poco probable sin una inmigración recurrente de hábitat naturales adyacentes (Schoener, 1989; Pulliam, 2000). De acuerdo al modelo de distribución actual, las especies persisten a largo plazo en hábitat naturales. Más aún, desde el punto de vista de conservación, esta propuesta satisface el principio precautorio: aun cuando el modelo de distribución actual sea erróneo, es conservador en términos de lo que constituye hábitat viables para las especies, por lo que no resultaría en un perjuicio a metas de conservación; es decir, si se seleccionan áreas de conservación usando este enfoque, aunque otras áreas también permitan la persistencia de la especie en cuestión, no resulta en un detrimento de la conservación de la biodiversidad por el uso de este modelo (Sarakinis *et al.*, 2001).

Se entiende entonces que el modelado del nicho ecológico provee un marco teórico para determinar el impacto del cambio climático sobre la distribución de especies, es decir, se proponen hipótesis de distribución actual y futuras de las especies, considerando el impacto potencial del cambio climático (Sánchez-Cordero *et al.*, 2004, 2005; Parra-Olea *et al.*, 2005). Las predicciones de las distribuciones actuales pueden ser validadas posteriormente en campo con muestreos faunísticos, probando presencia o ausencia de la especie en hábitat naturales *versus* hábitat transformados y en sitios en donde se ha estimado que las condiciones climáticas han cambiado o se espera que cambien (Sánchez-Cordero *et al.*, 2004). De hecho, se ha realizado una validación preliminar de estos modelos, confirmando las predicciones de presencia de especies endémicas de mamíferos en hábitat naturales en Oaxaca (Illoldi-Rangel *et al.*, 2004). Para obtener los modelos finales de distribución potencial actual y futura se corrieron los datos geográficos conocidos para las especies con 19 variables obtenidas de WorldClim 1.3. Estas variables se utilizan ampliamente en estudios de modelado por considerarse biológicamente significativas para caracterizar distribuciones de especies, ya que representan tendencias anuales, estacionalidad y factores limitantes o extremos (Hijmans *et al.*, 2005).

Análisis de vulnerabilidad de las especies

El procedimiento de selección de las especies para el análisis de vulnerabilidad se basó, por un lado, en el Programa de Conservación de Especies en Riesgo 2007-2012 (PROCER) que a través de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) desarrolla la SEMARNAT y, por el otro, en una reunión con especialistas y presidentes de los subcomités técnicos consultivos de especies prioritarias que originalmente constituyera la Dirección General de Vida Silvestre de la SEMARNAT. Dicha reunión tuvo como objetivo enriquecer la implementación del PROCER, precisando los criterios para la selección de especies e integrando la lista de aquellas especies que los expertos consideraran debían ser catalogadas como prioritarias. La priorización de especies se hizo a partir de la sumatoria de los criterios ponderados que los especialistas consideraron debían ser utilizados por especie (CONANP, 2007).

Dichos criterios consolidados fueron los que se incorporaron en este trabajo para llevar a cabo la priorización de las especies del estado de Morelos y son los que a continuación se enlistan: a) grado de amenaza, b) endemismo y distribución regional, c) valor socioeconómico y cultural, d) importancia internacional, e) condición de especie sombrilla o bandera, f) condición de especie indicadora o clave, g) rareza taxonómica, h) linajes evolutivos únicos, i) conflictos humanos–vida silvestre, j) especies con características poblacionales singulares (por ejemplo, migratorias), k) presión antropogénica, l) viabilidad de uso, m) viabilidad de recuperación, n) presencia en ANP, y ñ) biología y autoecología. La lista final con las especies prioritarias seleccionadas se presenta en la tabla 4.1.

Posteriormente, se llevó a cabo una compilación y revisión documental de las especies prioritarias. El reto, en este sentido, fue localizar la suficiente información de calidad, que el mismo análisis demandaba, para cada una de las especies, puesto que, lamentablemente, no existe información a detalle para muchas de las especies con distribución en el estado de Morelos. Por esta misma razón, incluso la CONABIO —la organización que se ha ocupado de compilar el conocimiento sobre las especies del país— ha reconocido abiertamente su enorme desconocimiento sobre algunas de las especies de Morelos, al grado de emitir, junto con el Gobierno del Estado de Morelos, una convocatoria para financiar algunos proyectos que cubran estos huecos de información. La CONABIO dispone de fichas técnicas informativas, con desigual calidad y cantidad de datos, para tan sólo cerca de 80 especies de plantas, hongos y animales que se distribuyen de manera natural en Morelos (CONABIO, 2012).

Matriz de vulnerabilidad total

La vulnerabilidad total es la sumatoria de los valores que se obtienen al analizar tres aspectos: el riesgo de exposición, la vulnerabilidad intrínseca y la capacidad de adaptación del sujeto evaluado (sean especies, taxa, ecosistemas u otro conglomerado). Por tanto, antes de llevar a cabo la valoración de la vulnerabilidad total debe definirse la importancia relativa que para el caso en análisis tienen cada uno de los siguientes ámbitos: riesgo de exposición, vulnerabilidad intrínseca y capacidad de adaptación.

Tabla 4.1. Listado de especies prioritarias con distribución en Morelos seleccionadas para el análisis de vulnerabilidad

Nombre científico	Nombre común
1. <i>Romerolagus diazi</i>	Teporingo
2. <i>Falco femoralis</i>	Halcón aplomado
3. <i>Leopardus wiedii glaucula</i>	Margay/Tigrillo
4. <i>Iguana iguana</i>	Iguana verde
5. <i>Leopardus pardalis nelsoni</i>	Ocelote
6. <i>Lontra longicaudis</i>	Nutria de río
7. <i>Passerina ciris</i>	Colorín
8. <i>Xenospiza baileyi</i>	Gorrión serrano
9. <i>Ctenosaura pectinata</i>	Iguana mexicana
10. <i>Leptonycteris nivalis</i>	Murciélago magueyero
11. <i>Leptonycteris yerbabuenae</i>	Murciélago magueyero
12. <i>Prosopis glandulosa</i>	Mezquite
13. <i>Zenaida macroura</i>	Paloma huilota
14. <i>Zenaida asiática</i>	Paloma de alas blancas
15. <i>Falco peregrinus</i>	Halcón peregrino
16. <i>Leptotila verreauxi</i>	Paloma suelera
17. <i>Pseudoerycea belli</i>	Salamandra
18. <i>Heloderma horridum</i>	Escorpión
19. <i>Musonycteris harrisoni</i>	Murciélago platanero
20. <i>Calidris mauri</i>	Playero occidental
21. <i>Cyrtonyx montezumae</i>	Codorniz moctezuma
22. <i>Odocoileus virginianus</i>	Venado cola blanca
23. <i>Dendrortyx macroura</i>	Gallinita de monte
24. <i>Ambystoma altamirani</i>	Ajolote de Zempoala
25. <i>Crotalus triseriatus</i>	Vívora de cascabel
26. <i>Herpailurus yagouaroundi</i>	Yagouaroundi
27. <i>Ara militaris</i>	Guacamaya verde
28. <i>Brongniartia vazquezii</i>	Endémica de selva baja
29. <i>Hintonia latiflora</i>	Cachalalate
30. <i>Ceiba aesculifolia</i>	Pochote
31. <i>Ictalurus balsanus</i>	Pez
32. <i>Boa constrictor imperator</i>	Mazacuata
33. <i>Phrynosoma Taurus</i>	Camaleón
34. <i>Phrynosoma orbiculare</i>	Camaleón
35. <i>Lysiloma divaricata</i>	Tepemezquite o tlahuitol
36. <i>Tabebuia impetiginosa</i>	Tlamiyahual

Para el caso concreto de este análisis de vulnerabilidad de la biodiversidad frente al cambio climático, el peso relativo que se asignó a cada uno de los ámbitos fue el siguiente:

Ámbito	Ponderación
Riesgo de exposición	2
Vulnerabilidad intrínseca	3
Capacidad de adaptación	-1

Para el caso concreto de la valoración de la vulnerabilidad de la biodiversidad frente al cambio climático, el lote de criterios aplicables en cada ámbito es el que se muestra a continuación, y son estos elementos los que se valoran al momento de aplicar el sistema de calificación comparativa y contra los que se asigna un valor o calificación. El valor recomendado se asigna cuando se reconoce que éste aplica o coincide con el mayor número de elementos o condiciones que se describen en la evaluación de los criterios; dicho de otra forma, se asigna el valor del párrafo que mejor describa la acción evaluada contra esos criterios. Los criterios deben ser evaluados con metodologías convencionales, mejores prácticas y procedimientos reconocidos y estándar; la profundidad dependerá de los recursos financieros, humanos y el tiempo que quiera invertirse en el análisis.

Se emplea una escala de cuatro valores, siendo cuatro el máximo y uno el mínimo. El empleo de esta escala permite clara e indubitablemente distinguir un polo del otro, dos valores más próximos a un extremo (tres y cuatro, los valores mayores), y los valores mínimos (uno y dos) más próximos al otro extremo. Los valores máximos resultantes de la sumatoria representan mayor vulnerabilidad total, y los mínimos, menor vulnerabilidad total.

A continuación se describen los criterios para cada ámbito y su asignación de valores.

Riesgo de exposición

El riesgo de exposición pretende dar una idea de la probabilidad que tiene el sujeto evaluado de entrar en contacto con los cambios en precipitación, en temperaturas, cambios en los patrones de las temporadas, tormentas y huracanes, es decir, de toda la variabilidad climática esperada y de los posibles efectos en la distribución espacial del sujeto de estudio (especies, taxa, ecosistemas entre otros) en períodos establecidos. La vulnerabilidad de la población humana y de los sistemas naturales al cambio climático varía fundamentalmente según la región y sus poblaciones. Los modelos de nicho ecológico antes descritos constituyeron la base para asignar los valores de riesgo de exposición.

Los criterios del riesgo de exposición son: a) se incrementa su distribución; b) permanece en el estado actual; c) se fragmenta su distribución; d) decrece su distribución actual.

Se asigna un valor de uno cuando la distribución del sujeto de estudio (especie, taxa o ecosistema) se amplía con respecto a su estado actual. Se asigna un valor de dos cuando la distribución no cambia significativamente respecto a su estado actual. Se asigna un valor de tres cuando la distribución del objeto se fragmenta con respecto a su estado actual y finalmente se asigna un valor de cuatro cuando la distribución decrece respecto al estado actual.

Vulnerabilidad intrínseca

Habla de las características propias del sujeto de estudio que lo hacen más o menos susceptible de afectación por los cambios que se esperan, se consideran en consecuencia sus relaciones interespecíficas o vínculos ecológicos, su grado de especialización y la dependencia o no a “disparadores ambientales específicos”, su vagilidad, en particular si es baja, es decir, si tiene una pobre habilidad de dispersión, sus estrategias reproductivas, su situación o grado de amenaza, su rareza taxonómica cuando se trata de linajes evolutivos únicos, su singularidad, pero también su condición endémica a Morelos, de ser el caso, o, bien, su presencia comparativa y la viabilidad genética independiente de las poblaciones locales, que muy probablemente va de la mano de su dispersión y densidad. La tolerancia o valencia ecológica de la especie, en particular nos ocupa la tolerancia a pulsos extremos, su resiliencia y la capacidad de resiliencia tratándose de un ecosistema.

Los criterios de vulnerabilidad intrínseca son: a) concatenación con vínculos ecológicos; b) vagilidad baja; c) situación o grado de amenaza; d) endemismo; e) dispersión y densidad; f) tolerancia o valencia ecológica; g) resiliencia; h) presencia comparativa; i) dependencia de fuentes extrarregionales; j) grado de especialización; k) estrategia reproductiva; l) dependencia a “disparadores específicos”; m) composición e interacciones a nivel ecosistémico y n) singularidad.

De acuerdo con los criterios de vulnerabilidad intrínseca, se asigna un valor de cuatro, como calificación, cuando la especie o sistema a calificar presenta alta dependencia a relaciones interespecíficas, un grado muy bajo de vagilidad, se reconoce como amenazado, sea nacional o internacionalmente, muy baja tolerancia o valencia ecológica, muy baja resiliencia, muy baja presencia comparativa, alta dependencia a fuentes extrarregionales, alto grado de especialización, tiempos de generación muy largos con muy pocas crías, alta dependencia a disparadores específicos, alta susceptibilidad al cambio en la composición e interacciones, y alta singularidad.

Se asigna un valor de tres cuando la especie o el sistema presenta dependencia media a relaciones interespecíficas, un grado bajo de vagilidad, baja tolerancia o valencia ecológica, baja resiliencia, baja presencia comparativa, dependencia media a fuentes extraregionales, grado de especialización medio, tiempos de generación largos con pocas crías, dependencia media a disparadores específicos, susceptibilidad media al cambio en la composición e interacciones, y singularidad media. Se asigna un valor de dos cuando la especie o sistema a calificar presenta baja dependencia a relaciones interespecíficas, un grado medio de vagilidad, un grado medio de tolerancia o valencia ecológica, resiliencia media, presencia comparativa media, baja dependencia a fuentes extraregionales, grado de especialización bajo, tiempos de generación cortos con considerables crías, baja dependencia a disparadores específicos, baja susceptibilidad al cambio en la composición e interacciones, y singularidad baja. Y, finalmente, se asigna un valor de uno cuando la especie o sistema presentan muy baja dependencia a relaciones interespecíficas, un grado alto de vagilidad, no se encuentra enlistada como amenazada, ni a nivel nacional ni internacional, tiene un grado alto de tolerancia o valencia ecológica, alta resiliencia, alta presencia comparativa, muy baja dependencia a fuentes extraregionales, grado de especialización muy bajo, tiempos de generación muy cortos con muchas crías, muy baja dependencia a disparadores específicos, muy baja susceptibilidad al cambio en la composición e interacciones, y singularidad muy baja.

Capacidad de adaptación

Habla de las características y factores que pueden aminorar o mitigar los efectos del cambio climático. Los criterios de capacidad de adaptación son: a) disponibilidad del hábitat apropiado; b) fragmentación; c) conflictos humanos-vida silvestre; d) probabilidad de la migración por propágulos; e) evidencia de la existencia de adaptaciones locales; f) respuestas adaptativas a distintos niveles (específico-taxa-ecosistémico); g) estado de poblaciones extraregionales; h) reclutamiento potencial; h) sinergia factorial; i) viabilidad de recuperación; j) presencia en ANP; k) otra condición del contexto que haga suponer que la capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático de la especie-taxon-ecosistema en cuestión será alta.

Se asigna un valor de cuatro, como calificación, cuando la especie o sistema a calificar presenta alta disponibilidad de hábitat apropiado, muy baja fragmentación del hábitat, muy baja presión antropogénica, no existen conflictos humano-vida silvestre, hay alta probabilidad de migración por propágulos, existe evidencia de adaptaciones locales, un alto potencial de respuestas adaptativas, alta calidad de las poblaciones extraregionales, alta calidad del ambiente fuera de la región, alta calidad del ambiente dentro de la región, alto reclutamiento poblacional, muy baja presencia de factores de estrés, alta viabilidad de recuperación y presencia en áreas naturales protegidas u otro régimen de protección. Se asigna un valor de tres cuando la especie o el sistema presenta disponibilidad media de hábitat apropiado, baja fragmentación del hábitat, baja presión

antropogénica, probabilidad media de migración por propágulos, potencial medio de respuestas adaptativas, calidad media de las poblaciones extraregionales, calidad media del ambiente fuera de la región, calidad media del ambiente dentro de la región, reclutamiento poblacional medio, baja presencia de factores de estrés y viabilidad de recuperación media. Se asigna un valor de dos cuando la especie o sistema a calificar presenta baja disponibilidad de hábitat apropiado, fragmentación media del hábitat, presión antropogénica media, baja probabilidad de migración por propágulos, bajo potencial de respuestas adaptativas, baja calidad de poblaciones extraregionales, baja calidad del ambiente fuera de la región, baja calidad del ambiente dentro de la región, bajo reclutamiento poblacional, presencia de factores de estrés media, y baja viabilidad de recuperación. Finalmente, se asigna un valor de uno cuando la especie o sistema presentan muy baja disponibilidad de hábitat apropiado, alta fragmentación del hábitat, alta presión antropogénica, existen frecuentes conflictos humano-vida silvestre, muy baja probabilidad de migración por propágulos, no existe evidencia de adaptaciones locales, hay muy bajo potencial de respuestas adaptativas, muy baja calidad de las poblaciones extraregionales, muy baja calidad del ambiente fuera de la región, muy baja calidad del ambiente dentro de la región, muy bajo reclutamiento poblacional, alta presencia de factores de estrés, muy baja viabilidad de recuperación y no hay presencia en áreas naturales protegidas u otro régimen de protección.

Resultados

Modelos de distribución potencial

Se realizó la modelación de nicho ecológico para aquellas especies de flora y fauna ($n=73$) que tuvieran los datos de geoposición accesibles. Las especies modeladas por grupo fueron, en total: 12 anfibios, 11 mamíferos, 24 reptiles, 14 aves y 12 especies de vegetación. Las especies que se modelaron son consideradas representativas de los ecosistemas del estado de Morelos.

En total se realizaron 296 modelos de nicho ecológico (cuatro por especie) para la distribución modelada actual y para los modelos de cambio climático hacia los años 2020, 2050 y 2080. En dichos modelos se muestra la probabilidad de ocurrencia en la distribución de las especies en cuatro rangos, tomando el cuatro como la mayor probabilidad y el uno como la menor probabilidad. Para cada caso se presentan cuatro mapas que ilustran los modelos de nicho ecológico proyectados como distribuciones potenciales (*sensu* REEMPE, es decir, Región Espacio Energética de Mayor Manifestación Probabilística),¹⁰ en el estado de Morelos y regiones circunvecinas. El

¹⁰ El término REEMPE fue tomado de la química y de la física, de la mecánica cuántica en específico. El orbital atómico es la descripción ondulatoria del tamaño, forma y orientación de una región del espacio disponible para un electrón. No representan la posición concreta de un electrón en el espacio, que no puede conocerse dada su naturaleza mecanocuántica, sino que representan una región del espacio en torno al núcleo atómico en la que la probabilidad de encontrar al electrón es elevada; cada orbital atómico

primer gráfico muestra en escalas de color azul la distribución potencial conocida actual; en el segundo mapa, de color verde, se presenta la distribución potencial en el año y escenario 2020; el tercer mapa, en escalas de color amarillo, muestra la distribución potencial en el escenario y año 2050, mientras que con escalas de color rojo, el cuarto mapa muestra la distribución potencial para el año y escenario 2080.

Puesto que el resultado obtenido para todas las especies prioritarias es del orden de más de 200 modelos, a continuación se presentan, a manera de ejemplo, los modelos de nicho ecológico de cinco especies representativas de cada grupo taxonómico.

Anfibios: *Plectrohyla chryses*

Para esta especie se puede observar que debido al cambio climático aumenta su rango de distribución dentro del estado de Morelos. En este caso en particular se puede observar que su distribución se incrementa a lo largo del tiempo, bajo este escenario de cambio climático, lo que podría indicar que esta especie puede ser beneficiada por los incrementos de temperatura esperados (Figura 4.1).

presenta una energía específica para el estado del electrón. La posición (la probabilidad de la amplitud) de encontrar un electrón en un punto determinado del espacio se define mediante sus coordenadas cartesianas en el espacio. Así que con el mismo sentido de mayores probabilidades de ocurrencia, en este caso, ya no de electrones sino de especies, es que se construyen las coberturas, empezando por la actual con información conocida de las colecciones científicas y las hipotéticas (*sensu* REEMPE) para los escenarios 2020, 2050 y 2080. Conforme esos resultados, se asigna un valor de uno cuando la distribución del sujeto de estudio (especie, taxa o ecosistema) se amplía con respecto a su estado actual. Se asigna un valor de dos cuando la distribución no cambia significativamente respecto a su estado actual. Se asigna un valor de tres cuando la distribución del objeto se fragmenta con respecto a su estado actual y finalmente se asigna un valor de cuatro cuando la distribución decrece respecto al estado actual.

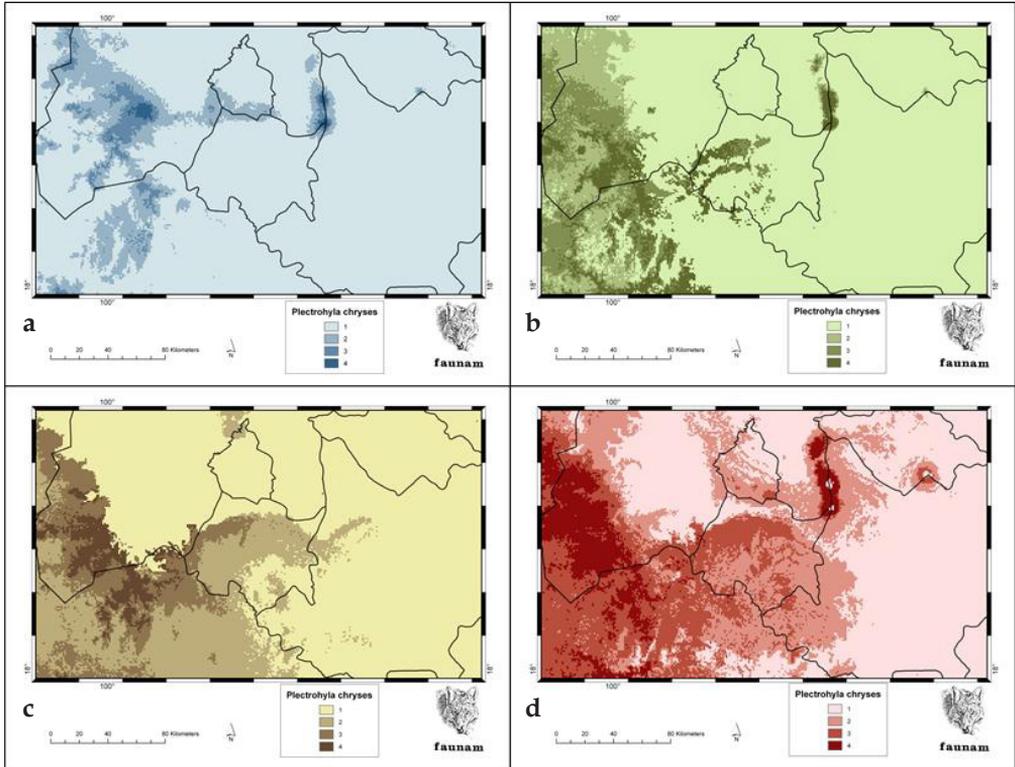


Figura 4.1. Ejemplo de modelo de nicho ecológico para la especie *Plectrohyla chryses*. Se muestra el modelo para (a) la distribución actual, (b) para el 2020, (c) para el 2050, y (d) para el 2080.

Reptiles: *Heloderma horridum*

En este caso se puede observar que, si bien se mantiene a lo largo del tiempo la distribución de la especie en gran parte del estado de Morelos, se presenta una disminución en las zonas con mayor probabilidad de aparición (marcadas con un color más oscuro) a lo largo de los diferentes modelos. En especial, se puede observar una disminución sustancial en el lapso de 2020 a 2050 y una fragmentación para el año 2080 (Figura 4.2).

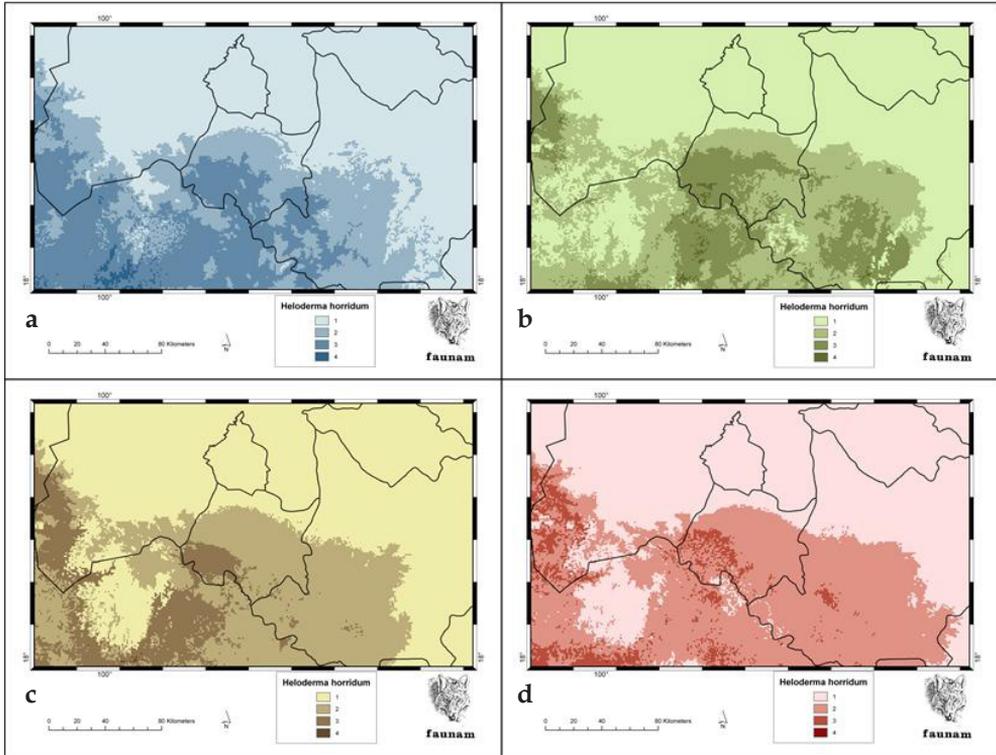


Figura 4.2. Ejemplo de modelo de nicho ecológico para la especie *Heloderma horridum*. Se muestra el modelo para (a) la distribución actual, (b) para el 2020, (c) para el 2050, y (d) para el 2080.

Aves: *Megascops seductus*

Para esta especie se puede observar que las zonas con mayor probabilidad de distribución se encuentran en la parte centro y sur del estado; sin embargo, ésta se fragmenta en el escenario de 2020 y presenta su momento crítico llegando a casi desaparecer en el escenario de 2050, recuperándose un poco en el escenario de 2080, aunque, de manera general, disminuye la cantidad de áreas con mayor probabilidad de aparición (Figura 4.3).

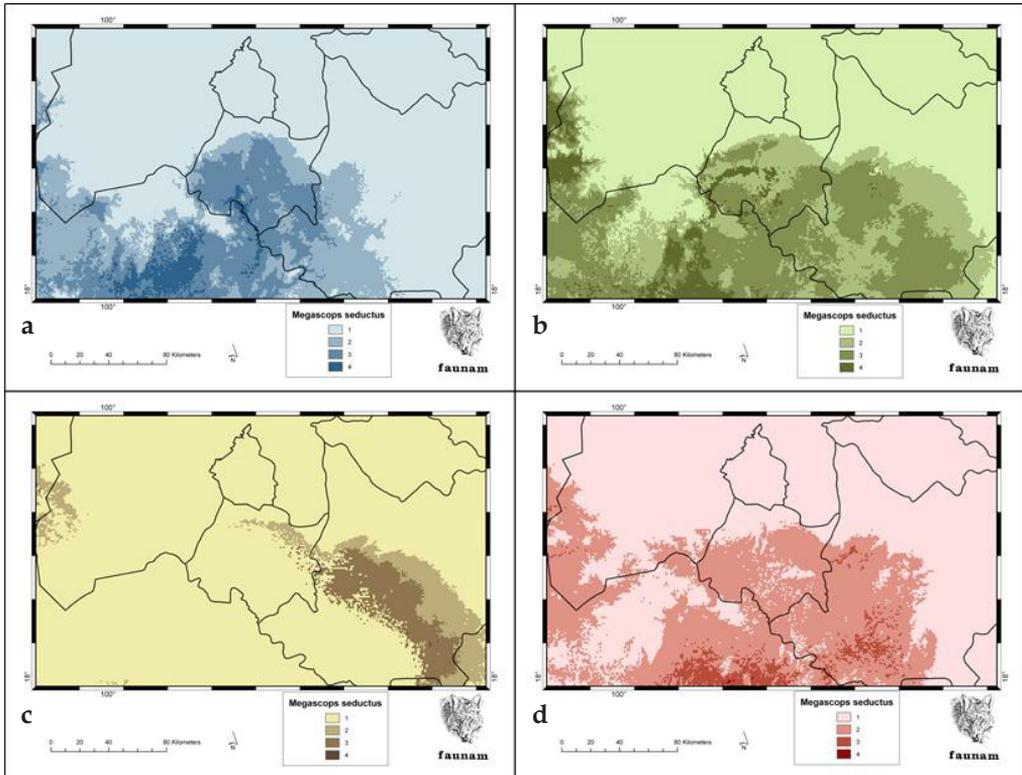


Figura 4.3. Ejemplo de modelo de nicho ecológico para la especie *Megascops seductus*. Se muestra el modelo para (a) la distribución actual, (b) para el 2020, (c) para el 2050, y (d) para el 2080.

Mamíferos: *Musonycteris harrisoni*

En este caso se puede observar que las zonas con mayor probabilidad de distribución cambian hacia el norte del estado del escenario actual al 2020, y se mantienen en el norte

en el escenario 2050, incluso incrementando su posible área de distribución y disminuyendo de manera importante las zonas con mayor probabilidad en el escenario 2080 (Figura 4.4).

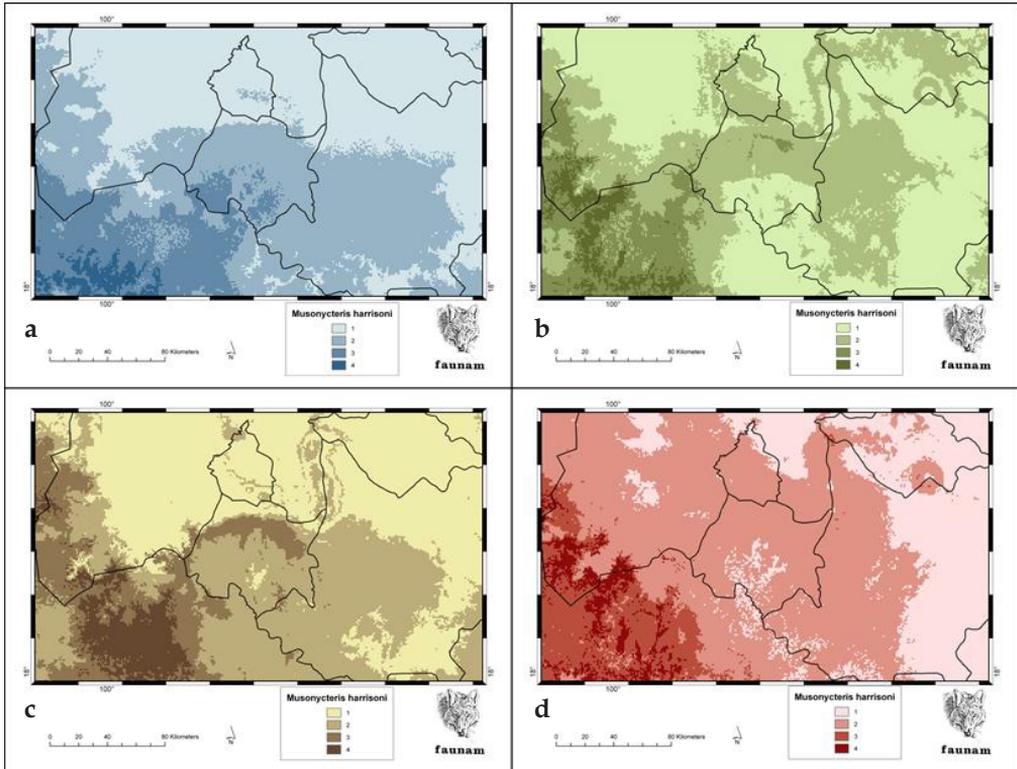


Figura 4.4. Ejemplo de modelo de nicho ecológico para la especie *Musonycteris harrisoni*. Se muestra el modelo para (a) la distribución actual, (b) para el 2020, (c) para el 2050, y (d) para el 2080.

Vegetación: *Bursera bipinnata*

Para esta especie, representativa de la selva baja caducifolia, se puede observar que incrementan las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia a lo largo del estado de Morelos. En este sentido, se espera que esta especie en particular sea beneficiada por los incrementos de temperatura esperados como consecuencia del cambio climático (Figura 4.5).

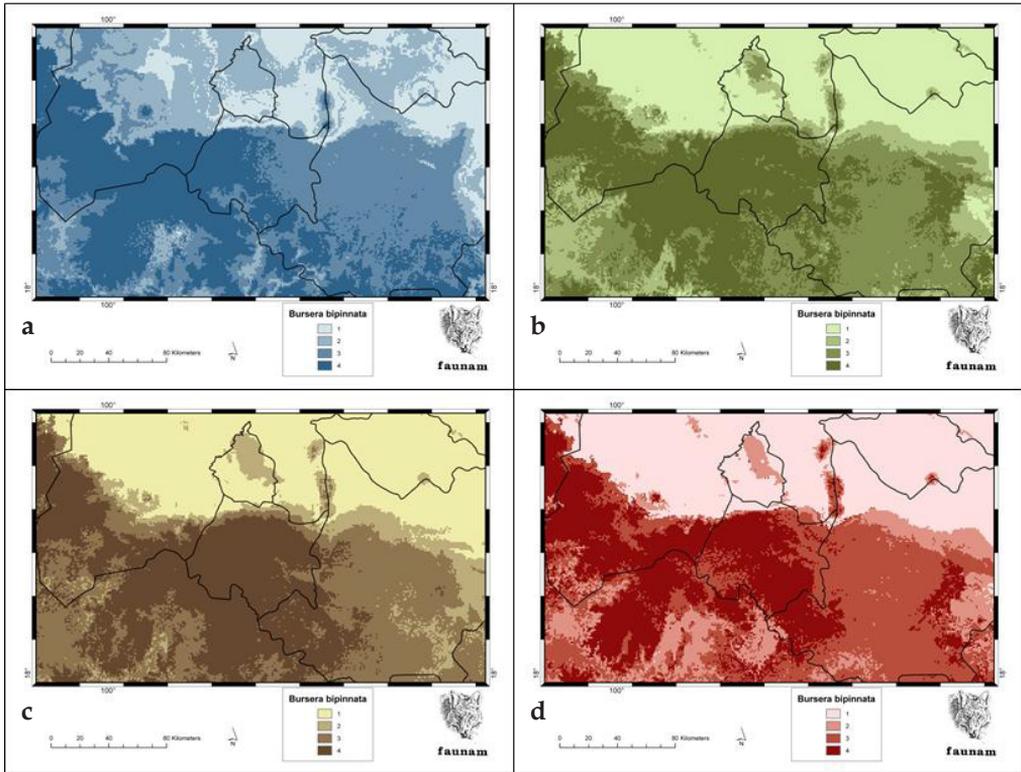


Figura 4.5. Ejemplo de modelo de nicho ecológico para la especie *Bursera bipinnata*. Se muestra el modelo para (a) la distribución actual, (b) para el 2020, (c) para el 2050, y (d) para el 2080.

Análisis de vulnerabilidad de la biodiversidad

Análisis de vulnerabilidad por grupos taxonómicos

En el análisis de vulnerabilidad por grupo taxonómico el grupo más vulnerable fue el de los anfibios (vulnerabilidad total de 12.03), mientras que el grupo taxonómico menos vulnerable fue el de los reptiles (vulnerabilidad total de 6.93). En ambos grupos el momento de las actividades de temporada como la hibernación, estivación y crianza están estrechamente relacionadas con las condiciones climáticas (Henle *et al.*, 2008) (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Vulnerabilidad total por grupo taxonómico

Grupo taxonómico	Riesgo de Exposición	Ponderación	Vulnerabilidad ad intrínseca	Ponderación	Capacidad de adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad ad total
Anfibios	2.22	4.44	3.08	9.25	1.67	-1.67	12.03
Reptiles	2.19	4.39	1.58	4.75	2.21	-2.21	6.93
Aves	2.40	4.81	2.14	6.43	2.29	-2.29	8.95
Mamíferos	1.88	3.76	2.36	7.09	1.73	-1.73	9.12
Vegetación	2.14	4.28	1.92	5.75	2.50	-2.50	7.53

Debido a que el grupo de los peces se encuentra dentro de áreas bien delimitadas, ya sea en ríos o lagos, y por las dificultades de geoposicionar la ubicación de los individuos, no es posible utilizar los mismos métodos de modelación y análisis de nicho ecológico; sin embargo, existen evidencias bibliográficas de que este grupo puede ser afectado por el cambio climático. De manera general se habla de que a lo largo de los principales ríos del estado de Morelos, los peces presentan marcadas variaciones tanto en su riqueza específica, como en la composición de las comunidades ícticas —situación que es asociada a los gradientes altitudinales—, lo que habla de la complejidad de los sistemas ribereños de la región (Contreras-McBeath *et al.*, 2004). En este sentido, cambios en la temperatura del agua pudieran afectar la composición de tales comunidades si estos cambios llegaran a detonarse debido al cambio climático; habría entonces que contemplar el posible daño que podría repercutir en la composición y estructura de redes tróficas, en donde participan los peces, y, en su caso, incentivar la reintroducción de especies nativas, ya que estas pueden estar mejor adaptadas y resistir los cambios que puedan ocurrir.

Debido a que la presencia de los peces depende de la cantidad y calidad del agua, y por sus características cuentan con una poca o nula vagilidad para escapar de condiciones adversas dentro de su hábitat, el grupo de los peces presenta una vulnerabilidad elevada tanto como por efectos de cambio climático (entendido como el incremento de temperatura así como de cambio en el régimen de lluvias) como por efectos de eutrofización, sedimentación, contaminación y uso del recurso agua de manera ineficiente.

Por otro lado, es bien conocida la importancia de la acuicultura en el Estado. En este ámbito, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés) destaca que el cambio climático brinda nuevas oportunidades, ya que en las regiones más cálidas puede aumentar la producción debido a una mejor tasa de crecimiento, una temporada más larga de crecimiento y la

disponibilidad de nuevas zonas de producción, anteriormente demasiado frías; sin embargo, dichas actividades acuaculturales han sido señaladas como las responsables de la introducción de especies exóticas, tanto para la producción pesquera como para la producción de peces ornamentales, por lo que habría que considerar el impacto que el incremento de dichas actividades podría causar en los ecosistemas acuáticos naturales con énfasis en las comunidades ícticas (Contreras-McBeath *et al.*, 2004).

Análisis de vulnerabilidad por especies

Anfibios

En el caso de los anfibios se calificaron especies, donde la mayoría tuvo calificaciones altas, arriba de diez puntos, con un promedio general de 12.03 puntos (sólo registrando la calificación más baja la especie *Hyla plicata* con 8.00 puntos y la calificación más alta la obtuvo la especie *Pseudoeurycea altamontana* con 16.33 puntos). En este caso, las calificaciones altas tuvieron que ver con reducciones en su distribución o fragmentación, con las características de vulnerabilidad intrínseca (como el grado de especialización de nichos específicos), pobre habilidad de dispersión, grados de endemismo, baja tolerancia a cambios en su hábitat y características de poca capacidad de adaptación (así como la existencia de otros factores de estrés tienen el potencial de exacerbar los efectos del cambio climático, como la contaminación) (Tabla 4.3).

Reptiles

En el caso de los reptiles se calificaron 24 especies, donde la mayoría tuvo calificaciones menores a diez puntos, con un promedio general de 6.93 puntos. Se otorgó la calificación más alta a la especie *Pseudoleptodeira latifasciata* con 13.67 puntos, y la más baja a la especie *Sceloporus grammicus* con 2.33 puntos. Las calificaciones bajas obtenidas en general para este grupo pueden ser el resultado de un incremento o permanencia de sus rangos de distribución, valores bajos en cuanto a vulnerabilidad intrínseca, aunque las capacidades de adaptación resultaron con valores bajos en general (Tabla 4.4).

Aves

En el caso de las aves se calificaron 14 especies, donde la mayoría tuvo calificaciones menores a diez puntos, con un promedio general de 8.95 puntos. Sólo registrando la calificación más alta la especie *Amaurospiza concolor* con 14 puntos, y la más baja la especie *Leptotila verreauxi* con cuatro puntos. Estas calificaciones pueden deberse a que en general se mantiene el rango de distribución modelado o, inclusive, se incrementa, las vulnerabilidades no son tan altas principalmente debido a la capacidad de movilidad y búsqueda de hábitats adecuados, y a que, en general, la capacidad de adaptación no registró valores mínimos (Tabla 4.5).

Tabla 4.3. Vulnerabilidad total para las doce especies de anfibios calificadas

Especie	Riesgo de Exposición					Ponderación	vulnerabilidad intrínseca	Ponderación	Capacidad de adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad total
	Año				Total						
	2020	2050	2080								
<i>Chiroptrorhynchus chiroptrorhynchus</i>	3.00	2.00	2.00		2.33	4.67	4.00	12.00	2.00	-2.00	14.67
<i>Exerodonta smaragdina</i>	3.00	4.00	1.00		2.67	5.33	3.00	9.00	1.00	-1.00	13.33
<i>Hyla plicata</i>	2.00	2.00	2.00		2.00	4.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.00
<i>Lithobates berlandieri</i>	3.00	3.00	3.00		3.00	6.00	3.00	9.00	2.00	-2.00	13.00
<i>Lithobates montezumae</i>	4.00	4.00	3.00		3.67	7.33	2.00	6.00	2.00	-2.00	11.33
<i>Plectrohyla arborescens</i>	1.00	1.00	4.00		2.00	4.00	4.00	12.00	1.00	-1.00	15.00
<i>Plectrohyla bistincta</i>	1.00	2.00	1.00		1.33	2.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	9.67
<i>Plectrohyla chiripes</i>	1.00	1.00	1.00		1.00	2.00	3.00	9.00	1.00	-1.00	10.00
<i>Pseudoeurycea altamontana</i>	3.00	2.00	3.00		2.67	5.33	4.00	12.00	1.00	-1.00	16.33
<i>Pseudoeurycea bellii</i>	1.00	2.00	2.00		1.67	3.33	3.00	9.00	2.00	-2.00	10.33
<i>Pseudoeurycea cephalica</i>	3.00	2.00	2.00		2.33	4.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.67
<i>Pseudoeurycea leprosa</i>	2.00	2.00	2.00		2.00	4.00	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.00
TAXA					2.22	4.44	3.08	9.25	1.67	-1.67	12.03

Tabla 4.4. Vulnerabilidad total para las 24 especies de reptiles calificadas

Especies	Riesgo de Exposición				Ponderación	Vulnerabilidad intrínseca	Ponderación	Capacidad adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad total
	Año			Total						
	2020	2050	2080							
<i>Crotalus triseriatus</i>	3.00	1.00	1.00	1.67	3.33	1.00	3.00	2.00	-2.00	4.33
<i>Ctenosaura pectinata</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	1.00	3.00	3.00	-3.00	4.00
<i>Gerrhonotus liocephalus</i>	1.00	3.00	1.00	1.67	3.33	1.00	3.00	3.00	-3.00	3.33
<i>Heterodroma horridum</i>	1.00	4.00	2.00	2.33	4.67	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.67
<i>Hypsiglena torquata</i>	1.00	4.00	3.00	2.67	5.33	1.00	3.00	2.00	-2.00	6.33
<i>Iguana iguana</i>	3.00	4.00	1.00	2.67	5.33	1.00	3.00	3.00	-3.00	5.33
<i>Inantodes gemmistratus</i>	4.00	4.00	1.00	3.00	6.00	1.00	3.00	2.00	-2.00	7.00
<i>Kinosternon integrum</i>	2.00	1.00	1.00	1.33	2.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	9.67
<i>Kinosternon scorpioides</i>	1.00	4.00	1.00	2.00	4.00	1.00	3.00	2.00	-2.00	5.00
<i>Lampropeltis triangulum</i>	3.00	3.00	1.00	2.33	4.67	1.00	3.00	1.00	-1.00	6.67
<i>Leptophis diplotropis</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	6.00	4.00	-4.00	7.33
<i>Loxocemus bicolor</i>	1.00	4.00	4.00	3.00	6.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	10.00
<i>Micrurus latifollaris</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	6.00	1.00	-1.00	10.33
<i>Phrynosoma orbiculare</i>	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.00
<i>Plestiodon copei</i>	2.00	3.00	1.00	2.00	4.00	1.00	3.00	1.00	-1.00	6.00
<i>Plestiodon lynxe</i>	1.00	2.00	2.00	1.67	3.33	1.00	3.00	3.00	-3.00	3.33
<i>Pseudoleptodeira latifasciata</i>	3.00	4.00	3.00	3.33	6.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	13.67
<i>Rhadinæa hesperia</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	6.00	1.00	-1.00	10.33
<i>Salvadora bairdi</i>	1.00	3.00	2.00	2.00	4.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.00
<i>Sceloporus grammicus</i>	1.00	2.00	2.00	1.67	3.33	1.00	3.00	4.00	-4.00	2.33
<i>Tamilla dappei</i>	4.00	1.00	2.00	2.33	4.67	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.67
<i>Thamnophis cyrtopsis</i>	1.00	2.00	1.00	1.33	2.67	1.00	3.00	3.00	-3.00	2.67
<i>Thamnophis scalaris</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	6.00
<i>Thamnophis scaliger</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	6.00	2.00	-2.00	9.33
TAXA				2.19	4.39	1.58	4.75	2.21	-2.21	6.93

Tabla 4.5. Vulnerabilidad total para las 14 especies de aves calificadas

Especie	Riesgo de Exposición				Ponderación	Vulnerabilidad intrínseca	Ponderación	Capacidad adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad total
	Año			Total						
	2020	2050	2080							
<i>Amaurospiza concolor</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	4.00	12.00	2.00	-2.00	14.00
<i>Asio stygius</i>	3.00	2.00	2.00	2.33	4.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.67
<i>Calidris mauri</i>	4.00	4.00	1.00	3.00	6.00	2.00	6.00	3.00	-3.00	9.00
<i>Cyrtonyx montezumae</i>	4.00	3.00	1.00	2.67	5.33	2.00	6.00	2.00	-2.00	9.33
<i>Dendrortyx macroura</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	6.00	2.00	-2.00	9.33
<i>Falco femoralis</i>	4.00	1.00	2.00	2.33	4.67	2.00	6.00	3.00	-3.00	7.67
<i>Falco peregrinus</i>	1.00	2.00	1.00	1.33	2.67	2.00	6.00	3.00	-3.00	5.67
<i>Leptotila verreauxi</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	1.00	3.00	3.00	-3.00	4.00
<i>Megascops seductus</i>	2.00	4.00	1.00	2.33	4.67	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.67
<i>Passerina ciris</i>	4.00	3.00	3.00	3.33	6.67	2.00	6.00	2.00	-2.00	10.67
<i>Rallus elegans</i>	3.00	3.00	4.00	3.33	6.67	2.00	6.00	2.00	-2.00	10.67
<i>Xenospiza baileyi</i>	1.00	1.00	2.00	1.33	2.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	9.67
<i>Zenaidra asiatica</i>	4.00	1.00	4.00	3.00	6.00	1.00	3.00	2.00	-2.00	7.00
<i>Zenaidra macroura</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	8.00
TAXA				2.40	4.81	2.14	6.43	2.29	-2.29	8.95

El cambio climático se ha convertido en un catalizador que acelera los factores que ponen en riesgo de extinción a una de cada ocho aves en el mundo. Las largas sequías y climas extremos inesperados aumentan la presión sobre los hábitats reducidos, de los que dependen muchas aves. Estos dos factores, en conjunto con una extensiva y continua pérdida de hábitat, han incrementado la tasa de extinción tanto en continentes como en islas (UICN, 2008a).

Algunos de los principales cambios detectados para las aves son los sesgos en la distribución geográfica, los cambios en la fecha de reproducción y en la selección de hábitat para nidificación (Thomas y Lennon, 1999 y McCarty *et al.*, 2001).

En México se hicieron simulaciones para ocho especies de aves de la familia Cracidae (chachalacas y otros) para explorar posibles escenarios de cambio en su área de distribución según el cambio climático (Peterson *et al.*, 2003). Algunas de las especies restringen su distribución, llegando incluso a no tener hábitat disponible en pocos años, mientras que otras se expanden. Esta respuesta depende de las características intrínsecas de cada especie (Kattan y Naranjo, 2008).

Algunos estudios que se enfocan en los efectos del cambio climático sobre las aves sugieren que algunas especies podrían extinguirse localmente o ampliar su distribución

dependiendo de sus capacidades de dispersión (Peterson *et al.*, 2001), de su amplitud de nicho (Peterson *et al.*, 2002) y de su distribución actual (Bravo-Cadena, 2010).

Un caso que merece la pena destacar es el de la gallinita de monte (*Dendrortyx macroura*) especie que se encuentra en los bosques de pino, encino y *Abies* con buena cobertura de sotobosque. Para esta especie se plantea una vulnerabilidad de 9.33 puntos, que podríamos considerar media, siendo principalmente afectada por la fragmentación de su hábitat debido a que en la zona donde se encuentra ubicada dentro del estado ha sido atacada desde hace varios años por tala ilegal, sobrepastoreo, ataque de mascotas humanas que se han convertido en ferales (como perros y gatos), además de la caza.

Es importante resaltar que este grupo puede ser utilizado como indicadores ya que nos permiten estimar el efecto que las modificaciones en el clima podrían tener en diversos sistemas biológicos, debido a sus características biológicas, como la especialización de hábitat o alimento, su rápida capacidad de respuesta a los cambios ambientales y distribución geográfica limitada (Sánchez *et al.*, 2012).

Por último, se debe tener en cuenta que si existen efectos negativos sobre las aves esto afectará a las comunidades humanas, directa o indirectamente, sobre todo en la polinización, la dispersión de semillas y el consumo de plagas. Se calcula que las aves que consumen néctar polinizan cerca del 15% de las plantas en muchos sitios de América (Buzato *et al.*, 2000), que las aves consumidoras de frutos dispersan entre el 30% y 70% de las semillas de plantas leñosas en América y Australia (Willson *et al.*, 1989) y que las aves que consumen insectos podrían evitar cerca del 28% de la pérdida en cosechas y madera (Forbush, 1929).

Las precipitaciones y la humedad son las variables climáticas de importancia crítica para las aves, y los cambios en éstas se espera que afecten a las aves, tanto directa como indirectamente. Algunas especies, como las aves de aguas continentales como los patos, son altamente dependientes de las precipitaciones para sostener sus hábitats de humedales y la provisión de alimentos constante (insectos y frutas). En consecuencia, la reducción de las precipitaciones tiene implicaciones importantes para estas especies (Wormworth y Mallon, 2006). Dichas precipitaciones también influyen en el comportamiento de las aves migratorias. Se espera que afecte a su comportamiento migratorio indirectamente al actuar sobre la disponibilidad de alimentos. La sequía en áreas importantes afecta a las aves migratorias en su capacidad para abastecerse de agua y alimento suficiente antes de cruzar barreras como los desiertos (Bairlein y Hüppop, 2004).

Mamíferos

En el caso de los mamíferos se calificaron once especies, de ellas, seis especies tuvieron calificaciones altas, arriba de diez puntos, y las otras cinco menores a ésta con un promedio de 9.12 puntos. La calificación más alta se registró para la especie *Leptonycteris curasoae*, con 15 puntos, y la más baja para este grupo, e incluso para todo el análisis, fue para la especie *Odocoileus virginianus* con 1.67 puntos. En general para los mamíferos la distribución dentro del estado de Morelos se fragmenta o disminuye y en cuanto a la vulnerabilidad intrínseca se registran valores variados dependiendo la especie, por ejemplo, la especie *Leptonycteris curasoae* tuvo un valor elevado debido, principalmente, a la fragmentación del hábitat y a la especialización del mismo (Tabla 4.6).

Considerado el ecosistema con mayor relevancia por Contreras-McBeath *et al.* (2004), de las 18 especies de mastofauna del estado de Morelos, se realizó la modelación y calificación de vulnerabilidad para *Romerolagus diazi* (Lagomorpha) en peligro de extinción, *Leptonycteris nivalis* (Chiroptera) amenazada, y el carnívoro *Leopardus wiedii*, considerado en peligro de extinción.

Tabla 4.6. Vulnerabilidad total para las once especies de mamíferos calificadas

Especie	Riesgo de Exposición				Ponderación	Vulnerabilidad intrínseca	Ponderación	Capacidad adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad total
	Año			Total						
	2020	2050	2080							
<i>Choeronycteris mexicana</i>	3.00	3.00	1.00	2.33	4.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.67
<i>Glaucomyz volans</i>	3.00	1.00	1.00	1.67	3.33	2.00	6.00	2.00	-2.00	7.33
<i>Leopardus pardalis</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	1.00	3.00	1.00	-1.00	6.00
<i>Leopardus wiedii</i>	1.00	1.00	2.00	1.33	2.67	2.00	6.00	1.00	-1.00	7.67
<i>Leptomycotis curasoae</i>	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	4.00	12.00	1.00	-1.00	15.00
<i>Leptomycotis nivalis</i>	1.00	1.00	3.00	1.67	3.33	3.00	9.00	1.00	-1.00	11.33
<i>Lontra longicaudis</i>	3.00	1.00	2.00	2.00	4.00	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.00
<i>Musonycteris harrisoni</i>	3.00	1.00	3.00	2.33	4.67	3.00	9.00	2.00	-2.00	11.67
<i>Odocoileus virginianus</i>	1.00	2.00	1.00	1.33	2.67	1.00	3.00	4.00	-4.00	1.67
<i>Romerolagus diazi</i>	4.00	3.00	2.00	3.00	6.00	2.00	6.00	1.00	-1.00	11.00
<i>Sciurus oculatus</i>	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	2.00	6.00	2.00	-2.00	6.00
TAXA				1.88	3.76	2.36	7.09	1.73	-1.73	9.12

En un estudio específico realizado por Anderson *et al.* (2009) para el conejo teporingo (*Romerolagus diazi*), se sugiere que éste cambiará su rango de distribución altitudinalmente, es decir, se moverá a lugares con más pendiente, además de que, en respuesta a los cambios climáticos, cambiará sus rangos de distribución, así como su población. También se menciona que el cambio climático amplifica la probabilidad de declive en la abundancia de las hembras, y una fragmentación de su hábitat debida a la fragmentación de grandes parches existentes en otros más pequeños. Por otro lado, en un trabajo llevado a cabo por Farías *et al.* (2010) en el que se realizó una modelación de cactus y su relación con murciélagos, se vio que los efectos del cambio climático pueden ocasionar reducciones en las distribuciones potenciales de las especies endémicas de las especies de cactus modeladas y, por tanto, tener efectos en las interacciones bióticas entre las especies de cactus y las de murciélagos cactófilicos, como es el caso de *Leptonycteris nivalis* especie calificada con alta vulnerabilidad total en el presente trabajo.

Otro impacto del cambio climático se puede ver en los mamíferos, en los que existe una estrecha relación entre la temperatura y la actividad metabólica. Los animales de talla mayor toleran mejor las temperaturas bajas debido a que, por la relación superficie-volumen, tienen una menor pérdida de calor, por esta razón se cree que mamíferos de mayor tamaño pueden ser altamente afectados por el aumento de temperatura global (Kerr y Kharouba, 2007). En el caso que nos ocupa, el cambio de temperatura no parece tener un efecto ostensible de este tipo sobre los mamíferos mayores que se distribuyen en el estado.

Vegetación

En el caso de la vegetación se calificaron doce especies representativas, donde la mayoría tuvo calificaciones menores a diez puntos, con un promedio general de 8.97 puntos. La calificación más alta se registró para la especie *Taxodium mucronatum*, con once puntos, y la más baja para la especie *Bursera bipinnata* con 3.33 puntos. Esto puede coincidir con los resultados mostrados por distintos trabajos en los que se menciona un posible movimiento de la selva baja hacia el norte del estado y una contracción de los bosques templados. Además, se debe considerar los impactos por el cambio del régimen de precipitación en los sistemas acuáticos, entre ellos el ripario, del cual el sabino *Taxodium mucronatum* forma parte (Tabla 4.7).

Como se señaló, se calificaron doce especies características de los principales tipos de vegetación presentes en el estado de Morelos. La mayoría de éstas tuvo calificaciones menores a diez puntos, con un promedio general de 8.97 puntos. La calificación más alta se registró para la especie *Taxodium mucronatum*, con once puntos, y la más baja para la especie *Bursera bipinnata* con 3.33 puntos.

Tabla 4.7. Vulnerabilidad total para las doce especies de vegetación calificadas

Especie	Riesgo de Exposición				Ponderación	Vulnerabilidad intrínseca	Ponderación	Capacidad adaptación	Ponderación	Vulnerabilidad total
	Año		Total							
	2020	2050	2080	Total						
<i>Abies religiosa</i>	4.00	2.00	2.00	2.67	5.33	2.00	2.00	-2.00	9.33	
<i>Arbutus xalapensis</i>	1.00	2.00	2.00	1.67	3.33	2.00	2.00	-2.00	7.33	
<i>Bursera bipinnata</i>	1.00	1.00	3.00	1.67	3.33	1.00	3.00	-3.00	3.33	
<i>Bursera copallifera</i>	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	1.00	3.00	-3.00	4.00	
<i>Carpinus caroliniana</i>	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	2.00	2.00	-2.00	8.00	
<i>Muldenbergia macroura</i>	4.00	2.00	3.00	3.00	6.00	2.00	3.00	-3.00	9.00	
<i>Pinus ayacahuite</i>	1.00	3.00	3.00	2.33	4.67	2.00	2.00	-2.00	8.67	
<i>Pinus moctezumae</i>	1.00	2.00	3.00	2.00	4.00	2.00	2.00	-2.00	8.00	
<i>Quercus magnoliifolia</i>	1.00	2.00	2.00	1.67	3.33	2.00	3.00	-3.00	6.33	
<i>Quercus rugosa</i>	3.00	2.00	2.00	2.33	4.67	2.00	3.00	-3.00	7.67	
<i>Stipa ichu</i>	2.00	2.00	3.00	2.33	4.67	2.00	3.00	-3.00	7.67	
<i>Taxodium mucronatum</i>	2.00	2.00	2.00	2.00	4.00	3.00	2.00	-2.00	11.00	
TAXA				2.14	4.28	1.92	2.50	-2.50	7.53	

El bosque perennifolio ripario, parte del ecosistema acuático, fue el tipo de vegetación que obtuvo una mayor calificación de vulnerabilidad (10.53 puntos); le siguen a éste los bosques de Coníferas y de *Quercus*, con 8.65 y 8.40 puntos respectivamente. El tipo de vegetación menos vulnerable fue el Zacatanoal, con 7.62 puntos. Es importante mencionar que después de la calificación más alta, los demás tipos de vegetación presentes en el estado variaron muy poco en cuanto a las calificaciones de vulnerabilidad total.

Una especie con una de las calificaciones altas dentro de la vegetación es el Oyamel (*Abies religiosa*), especie que se encuentra ubicada en los sitios de alta montaña en la parte norte del estado. Según los modelos de nicho ecológico, esta especie sufrirá de fragmentación en su distribución debido al cambio climático, lo cual, aunado a la ampliación de la frontera agrícola y al cambio de uso de suelo, exacerbará su vulnerabilidad, aunque no sólo la de esta especie si no de todas las ligadas al bosque de coníferas, como la especie representativa de los zacatonales *Muhlenbergia macroura*, que en este estudio resultó con la tercera calificación más alta en cuanto a vulnerabilidad, como resultado principalmente de la fragmentación de su hábitat.

Las especies calificadas representativas del bosque mesófilo de montaña *Carpinus caroliniana* y *Arbutus xalapensis* se mantuvieron dentro de su rango de distribución, ubicado principalmente entre los municipios de Huitzilac, norte de Cuernavaca y Tepoztlán, sobre barrancas y laderas húmedas aledañas a las zonas montañosas. Por otro lado, especies representativas de la selva baja caducifolia como *Bursera copallifera* y *Bursera bipinnata* registraron la menor vulnerabilidad en el grupo de vegetación, manteniendo e, inclusive, aumentando su distribución, como es el caso de esta última.

Es posible que también se presenten cambios en las épocas de floración y fructificación. Este estrés en la vegetación puede ocasionar traslocaciones de hábitat de especies de fauna y posiblemente fenómenos de extensión en cascada. Los cambios en la fenología pueden afectar el éxito reproductivo de los individuos y, por lo tanto, la dinámica y persistencia de las poblaciones, la estructura y diversidad de las comunidades, y el funcionamiento de los ecosistemas enteros (Henle *et al.*, 2008).

El cambio climático va a causar el desplazamiento de las zonas de vida, definidas como zonas con condiciones climáticas adecuadas para un tipo dado de ecosistema. Frente a estos cambios, las especies constitutivas de un ecosistema pueden adaptarse mediante la plasticidad fenotípica, la evolución adaptativa y la migración (Markham, 1996; Bawa y Dayanandan, 1998). Un cambio tan rápido de temperatura no le permitiría a los organismos adaptarse y responder a los nuevos cambios. Los bosques húmedos pueden empezar a tener procesos de sequía que afectan la comunidad de especies adaptadas a la humedad (Kattan y Naranjo, 2008).

Para las plantas, con el aumento del CO₂ algunas especies crecerán más y los insectos herbívoros asociados a ellas también, pero otras plantas se extinguirán. Las hojas de plantas que han crecido en ambientes ricos en CO₂ tienen menor proporción de nitrógeno en relación con el carbono; este tipo de ambientes rebaja la fertilidad del suelo y el flujo de nutrientes, de ahí que la hipótesis de que a mayor CO₂ menor producción agrícola sustentable. Además, algunas gramíneas consideradas “malas hierbas” se desarrollan mejor en ambientes ricos en CO₂, lo que afecta de manera negativa los cultivos. Si las hojas de las plantas empiezan a tener cambios en la cualidad nutricional por efecto del CO₂, los insectos herbívoros deberán comer mayor proporción de hojas, que bien podrían ser las de los cultivos, para suplir sus necesidades metabólicas (como ha sido demostrado para larvas de saltamontes y mariposas) (Kattan y Naranjo, 2008).

Discusión

Modelos de distribución potencial

Si bien los modelos de nicho ecológico no son concluyentes porque ilustran las distribuciones potenciales por probabilidades (REEMPE), carecen de información suficiente y presentan diversidad de escalas, los resultados muestran que los grupos taxonómicos, para los cuales los modelos revelan cambios en los rangos potenciales de distribución, son los anfibios, los reptiles y las aves. Algunas especies son mucho más susceptibles a los impactos del cambio climático que otras debido a las características inherentes biológicas relacionadas con su historia de vida, ecología, comportamiento, fisiología y genética. Por otro lado, los más altos riesgos de extinción de las especies se producen cuando éstas experimentan una alta susceptibilidad al cambio climático (Foden *et al.*, 2008).

Para el grupo de los anfibios habrá que considerar los cambios extremos en la temperatura, principalmente en las zonas al norte del estado, ya que se sabe que los inviernos fríos pueden afectar negativamente la supervivencia de ranas adultas y la mortalidad en masa de hibernáculos, seguido de disminución de la población (Anholt *et al.*, 2003). Por otro lado, un efecto del cambio climático aunado con el manejo insostenible del recurso agua puede ocasionar el fracaso total de la metamorfosis debido a la desecación de los estanques de temporal que reduce las poblaciones y trae como consecuencia las fluctuaciones dramáticas, sobre todo si las sequías se presentan año tras año, representando un ambiente hostil (Henle *et al.*, 2008). Para los anfibios, el aumento de las temperaturas puede tener efectos positivos o negativos sobre el crecimiento. El crecimiento de los anfibios postmetamórficos depende de la temperatura (pero pocos estudios sobre las poblaciones naturales están disponibles), por lo tanto, deben beneficiarse de los incrementos previstos en la temperatura durante la temporada activa, a menos que la temperatura sobrepase los límites críticos térmicos (Brattström, 1963; Lillywhite *et al.*, 1973; Claussen, 1977). En general, los anfibios

deberían beneficiarse del aumento en la temperatura, ya que las temperaturas bajas, que impiden la metamorfosis, pueden ser un factor limitante del área de distribución geográfica de ciertas especies; además, el riesgo de que la metamorfosis no se lleve a cabo se reduciría considerablemente en inviernos más cálidos (Smith-Gill y Bervem, 1979).

Se ha mencionado que las ranas de los bosques de niebla son altamente vulnerables frente al cambio climático ya que dependen de la alta humedad ambiental que existe en las áreas donde se encuentran estos ecosistemas para conseguir su reproducción, debido a que sus huevos se desarrollan sólo en sitios muy húmedos; si dicha humedad ambiental se reduce durante largos períodos, los adultos no tienen descendencia, ya que sus huevos se secan y mueren rápidamente (INE, 2010a, 2010b). El mayor número de especies de anfibios se distribuye en el área natural protegida ubicada al norte del estado, denominada Corredor Biológico Chichinautzin (COBIO Chichinautzin), debido a la humedad que prevalece en esa región a lo largo del año. Dicha humedad se conserva por la densa vegetación, las zonas con buena cobertura del sotobosque, la cobertura del suelo por la defoliación de los pinos y encinos. Contreras-McBeath *et al.*, (2004) mencionan que sólo en el COBIO Chichinautzin (que incorpora los parques nacionales “Lagunas de Zempoala” -PNLZ- y “El Tepozteco” -PNET-) es posible encontrar a las salamandras de la familia Pletodontidae y los ajolotes de la familia Ambystomidae representado por *Ambystoma altamirani* que tiene un área de distribución limitada en Morelos a los riachuelos y lagunas del PNLZ. Para el caso de esta última especie, debido a su acotada distribución, tampoco fue posible modelar su distribución dentro del presente trabajo, sin embargo, sabemos que por sus características biológicas, ecológicas, distribución acotada y el uso del agua en la zona, la especie tiene una alta vulnerabilidad al cambio climático.

En cuanto al grupo de las aves, se presupone, por ejemplo, que las especies presentes en Morelos de ciertas familias de aves como son Turdidae (60%) y Scolopacidae (70%) están en mayor peligro por el cambio climático mientras que las familias Ardeidae (3%), Accipitridae (10%), Cuculidae (15%), Picidae (21%) y Columbidae (27%) despliegan, en contraste, bajos niveles de susceptibilidad (Foden *et al.*, 2008; Ramírez-Albores y Ramírez-Cedillo, 2002).

En cuanto al grupo de los reptiles (en particular los acuáticos), al igual que los anfibios, en la medida en que desaparezcan sus hábitats como consecuencia del cambio climático, sufrirán grandes pérdidas en sus poblaciones (Henle *et al.*, 2008); aunque, a diferencia de los anfibios, los reptiles han desarrollado una variedad de adaptaciones para hacer frente a la escasez de agua y crecer bien en climas cálidos (Lillywhite y Maderson, 1982; Pianka, 1986; Bradshaw, 1987; Packard y Packard, 1988). Los anfibios son muy dependientes de los ambientes húmedos durante la mayor parte de su vida y tienen su mayor diversidad en los trópicos húmedos (Duellman y Trueb, 1986; Warbug, 1997;

Duellman, 1999); no obstante, hay que considerar que existe un número considerable de especies de reptiles acuáticos o semiacuáticos entre las tortugas y serpientes (Henle *et al.*, 2008). Tomando como base la información generada por Castro-Franco y Bustos (1994) sobre la distribución de lagartijas y tortugas en los diferentes tipos de vegetación de Morelos, se indica que la única especie de tortuga registrada (*Kinosternon integrum*) se presenta tanto en el bosque templado frío (oyamel, pino y bosque mixto de pino-encino) como en el bosque tropical caducifolio. Por su parte, las especies de lagartijas muestran tres patrones de distribución: a) uno de distribución limitada al bosque templado frío, b) otro limitado al bosque tropical caducifolio y c) otro con distribución en ambos tipos de vegetación. En Morelos, las especies de reptiles que se distribuyen tanto en los bosques templados como en el bosque tropical caducifolio y que debido a su amplia distribución podrían estar menos propensos al cambio climático son *Norops nebulosus*, *Urosaurus bicarinatus bicarinatus* y *Sceloporus spinosus horridus*. Por otro lado, entre las especies que se encuentran restringidas al bosque templado, el cual puede ser impactado por el cambio climático, son el falso camaleón (*Phrynosoma orbiculare alticola*) y algunas especies de lagartijas como *Sceloporus aeneus*, *S. garmmicus*, *S. palaciosi*, *S. scalaris*, y *S. torquatus*. De las especies distribuidas solamente en el bosque tropical caducifolio se pueden citar varias especies de lagartijas, como *Coleonyx elegans nemoralis*, *Sceloporus ochoterenai*, *S. siniferus*, *Hemidactylus frenatus*, *Cnemidophorus costatus*, *C. deppe*, la iguana negra (*Ctenosaura pectinata*) y el monstruo de gila (*Heloderma horridum*) (Contreras-McBeath *et al.*, 2004).

Finalmente, en cuanto a los modelos de nicho ecológico, es importante mencionar que los rangos actuales de distribución (año 2012) muestran, para la gran mayoría de las especies, una reducción significativa en los rangos de su distribución histórica, y esto es así dada la multitud de efectos negativos persistentes que inciden en la sobrevivencia de las especies, incluidos tanto los provocados por el cambio climático como los efectos de origen antropogénico.

Análisis de vulnerabilidad de la biodiversidad

El 53.42% de las especies calificadas resultaron con una vulnerabilidad total media, dentro de un rango de 5.1 a 10 puntos. Algunas de las especies relevantes en este rango son: la rana arbórea (*Plectrohyla chryses*), el escorpión (*Heloderma horridum*), la tortuga casquito (*Kinosternon integrum*), el falso camaleón (*Phrynosoma orbiculare*); algunas de las aves son, el halcón aplomado (*Falco femoralis*), la huilota (*Zenaida macroura*), el halcón peregrino (*Falco peregrinus*), la gallinita de monte (*Dendrortyx macroura*) y el gorrión serrano (*Xenospiza baileyi*); entre los mamíferos están el ocelote (*Leopardus pardalis*) y el tigrillo (*Leopardus wiedii*); y en cuanto a la vegetación podemos encontrar a la especie de pasto amacollado *Stipa ichu*, los pinos *Pinus ayacahuite* y *P. moctezumae*, una especie de encino (*Quercus rugosa*) y el madroño (*Arbutus xalapensis*).

En un rango de mayor vulnerabilidad total se encuentran el 30.13% de las especies calificadas. Algunas de las especies más importantes son: el teporingo o conejo de los volcanes (*Romerolagus diazi*), la nutria (*Lontra longicaudis*), el murciélago maguero (*Leptonycteris nivalis*) y los murciélagos *Leptonycteris curasoae* y *Chiropterotriton chiropterus*; entre los anfibios se encuentran tres especies de salamandras (*Pseudoeurycea cephalica*, *P. leprosa* y *P. belli*) y la rana arbórea (*Plectrohyla arborescandens*); entre las aves, el búho cara oscura (*Asio stygius*) y el ave semillero azul (*Amaurospiza concolor*); en la vegetación en este rango está el sabino (*Taxodium mucronatum*).

El 15.6% de las especies calificadas obtuvieron la vulnerabilidad total más baja. En este rango se encuentran especies como la iguana (*Ctenosaura pectinata*), la tortuga estuche (*Kinosternon scorpioides*), la serpiente cascabel (*Crotalus triseriatus*), la lagartija escorpión (*Gerrhonotus liocephalus*), la paloma arroyera (*Leptotila verreauxi*), dos especies de palo mulato (*Bursera copallifera* y *B. bipinnata*) y la especie con menor calificación de todo el estudio, el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*).

En este análisis, una especie resultó dentro del rango mayor a 15 puntos, ésta fue la *Pseudoeurycea altamontana*, con 16.33 puntos, lo que quiere decir que presentó la mayor vulnerabilidad total.

Aunque lo realizado aquí es un avance modesto y limitado, se requiere, sin duda, de mucha mayor información para poder realizar un análisis contundente sobre la vulnerabilidad de la biodiversidad en todos sus niveles, ya no sólo a nivel de especies y no únicamente para una muestra aleatoria de ellas, y aunque se dispone de más información (por ejemplo, de análisis de vulnerabilidad a nivel de ecosistema y áreas naturales protegidas) ésta se dará a conocer a medida que sea procesada.

Conclusiones

La respuesta de las especies al calentamiento atmosférico, y a todas las consecuencias y efectos macro y micro que ello trae aparejado, es a nivel de especie y diferenciales (Trejo *et al.*, 2011), esto es, seres vivos con márgenes de tolerancia fisiológica y resiliencia individuales a cambios de humedad, temperatura, insolación, exposición a vientos, orientación o campos magnéticos, altitud, etcétera. Para el caso específico del estado de Morelos y su biodiversidad, lo verdaderamente crítico no serán las variaciones promedio en el régimen de lluvias o en las temperaturas sino la frecuencia y duración de los pulsos extremos en la presencia o ausencia de agua, o la persistencia de temperaturas extremas altas o bajas según sea el caso. Que se presente una helada no es un fenómeno inusual en las regiones templadas del estado, por mencionar un ejemplo, pero que la helada tenga una duración mucho mayor a la usual puede hacer la diferencia para la sobrevivencia de algunas poblaciones vulnerables; lo mismo podría decirse, por ejemplo, si se presenta una canícula más aguda tanto por la temperatura

extrema (al alta) como por su duración. De darse este escenario, algunos cuerpos de agua pueden llegar a disminuir significativamente en la cantidad y la calidad de sus aguas y, por ende, en su profundidad y niveles de evaporación, cambiar sensiblemente su temperatura o hasta desaparecer, con todas las consecuencias y efectos que de ello puedan derivarse local, próxima y hasta remotamente (no olvidemos que muchos de estos cuerpos de agua están vinculados con otros espacios más lejanos, sea de forma subterránea o superficial). Dentro de los efectos de corto plazo están, por supuesto, la posible desaparición de poblaciones de ciertas especies de plantas y animales, los cambios en los patrones de distribución y composiciones florísticas y faunísticas de dichos reservorios, esto sin mencionar los efectos predecibles en plazos mayores.

Si bien es cierto que las repuestas de las especies al cambio climático, a nivel de sus distribuciones, será individual y dependerá de sus características y habilidad para cambiar y adaptarse, también hay características o situaciones que colocan a las poblaciones y a las especies en una condición de mayor vulnerabilidad. A la luz de estas consideraciones los pronósticos de sobrevivencia de especies morelenses ante los escenarios de cambio climático adquieren nuevas tonalidades.

La necesidad de entender la vulnerabilidad de los ecosistemas y sus consecuencias para las poblaciones locales y los sectores implicados en el manejo de los ecosistemas es un desafío. Por ejemplo, algunos de los efectos que el cambio climático podría traer a la población morelense son: a) desaparición de especies útiles (en uso y potenciales), por tanto, reducción en el número de especies aprovechables; b) depauperización de dieta rural por eliminación de especies; c) incremento en niveles de pobreza por escasez de especies útiles como alimento, como materia prima, como combustible, como elemento constructivo, como pieza de intercambio comercial, etcétera; d) menor recreación natural (por ejemplo, la caza deportiva, la observación de la vida silvestre, convivencia con la naturaleza); y, e) afectación de prácticas culturales y religiosas de pueblos indígenas o autóctonos que emplean elementos naturales, por mencionar sólo algunos ejemplos.

La solución a este tipo de desafíos requiere la integración tanto de factores climáticos como socioeconómicos para luego diseñar medidas de adaptación adecuadas al contexto local institucional (Burton *et al.*, 2002; Füßel, 2007; Agrawal, 2008; Boyd, 2008; Ribot, 2009). Otros desafíos se refieren a las políticas que pueden facilitar procesos de adaptación de los ecosistemas. En muchos países, el primer paso para facilitar la adaptación es la definición de nuevas políticas o la ejecución de políticas existentes para la conservación o el manejo sostenible de ecosistemas. En lugares donde las amenazas no climáticas, como la deforestación, son las principales razones de degradación ambiental, como es el caso en el estado de Morelos, hablar de adaptación de los ecosistemas se juzga irrelevante y puede parecer un ejercicio puramente académico; en ese caso, por ejemplo, el manejo sostenible de los bosques, es un paso más importante

para reducir la vulnerabilidad forestal (Roberts, 2008; Locatelli *et al.*, 2008; Martínez-Alonso *et al.*, 2010). El concepto de adaptación basado en ecosistemas (EBA, por sus siglas en inglés, Ecosystem-Based Adaptation)¹¹ al que se le refiere también como “soluciones basadas en la naturaleza” ha emergido recientemente en las discusiones internacionales sobre adaptación al cambio climático (UICN, 2008a, 2008b; FAO, 2010; IUCN, 2012; Lhumeau y Cordero, 2012). Con este enfoque se pretende mantener e incrementar la resiliencia y reducir la vulnerabilidad (sensibilidad+exposición) de ecosistemas y comunidades humanas ante el cambio climático global (March *et al.*, 2011). La adaptación con base en ecosistemas pretende establecer un círculo virtuoso entre las acciones que soporten la sustentabilidad de las comunidades humanas, las acciones de conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos, a través de medidas de adaptación que favorezcan a estos tres objetivos de manera simultánea.

Al aumentar la variabilidad y la intensidad y frecuencia de los eventos extremos, el cambio climático puede afectar negativamente a los ecosistemas y sus servicios (por ejemplo, cantidad y calidad del agua, fertilidad de suelos, biodiversidad, captura de carbono y crecimiento vegetal). La adaptación de los ecosistemas frente a la exposición a la variabilidad, y los eventos extremos, pueden verse como acciones a tomar para que no pierdan resiliencia y para que disminuyan su vulnerabilidad, aumentando la capacidad adaptativa. En este sentido, el papel de las instituciones es clave en el proceso adaptativo, ya que orienta las relaciones entre la sociedad y la naturaleza (Oyhantçabal, 2010), por esta razón la institucionalidad debe, a su vez, adaptarse para cumplir dicho papel eficazmente. Adaptarse al cambio climático no es sólo cuestión de adoptar mejores prácticas sino que también implica cambios en las organizaciones y en las normas.

Referencias bibliográficas

Agrawal A. (2008). The role of local institutions in adaptation to climate change. International Forestry Research and Institutions Program (IFRI) Working Paper no. W08I-3, University of Michigan. Michigan, EEUU.

¹¹ EBA es un conjunto de medidas y políticas que reconoce el papel que los ecosistemas funcionales tienen en la reducción de la vulnerabilidad de la sociedad al cambio climático, es un enfoque multisectorial y multiescalas. EBA involucra a diferentes actores (por ejemplo, autoridades locales y nacionales, comunidades locales, sectores privados, ONG, la academia, etcétera) para lograr un manejo más sostenible de los ecosistemas, con una perspectiva de adaptación de la sociedad (Martínez-Alonso *et al.*, 2010; UICN, 2012).

- Aguilar A. (2000). Los asentamientos humanos y el cambio climático en México un escenario futuro de la vulnerabilidad regional. pp. 129-144 En: México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Gay, C., (Compilador) Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México, 220 pp.
- Aguilar B. (1995). Ecología del estado de Morelos. Editorial Praxis. Instituto Estatal de Documentación de Morelos. 469 pp.
- Anderson B., Akçakaya H., Araújo M., Fordham D., Martínez-Meyer E., Thuiller W., Brook B. (2009). Dynamics of range margins for metapopulations under climate change. *Proceedings of the royal society B*. 276:1415-1420 pp.
- Anholt B., Hotz H., Guex G. y Semlitsch R. (2003). Overwinter survival of *Rana lessonae* and its hemiclinal associate *Rana esculenta*. *Ecology*. 84:391-397 pp.
- Arnell N., Livermore M., Kovats S., Levy P., Nicholls R., Parry M. y Gaffin S. (2004). Climate and socioeconomic scenarios for climate change impacts assessments: Characterising the SRES storylines. *Global Environmental Change*. 14(1): 3–20 pp.
- Bairlein F. y Hüppop O. (2004). Migratory fuelling and global climate change. *Advances Ecological Research*. 35:33-47pp.
- Ballesteros-Barrera C., Martínez-Meyer E., y Gadsden H. (2007). Effects of Land-Cover Transformation and Climate Change on the Distribution of Two Microendemic Lizards, Genus *Uma*, of Northern Mexico. *Journal of Herpetology*. 41(4):733-740 pp.
- Bawa K. y Dayanandan S. (1998). Global climate change and tropical forest genetic resources. *Climate Change*. 39:473-485 pp.
- Bellon M., Maser O. y Segura G. (1994). Response Options for Sequestering Carbon in Mexico's Forests. En Report to the F-7, International Network on Tropical Forestry and Global Climatic Change, Energy and Environment Division, Lawrence-Berkeley Laboratory, Environmental Protection Agency, Berkeley, California, EEUU.
- Bolongaro Crevenna R. A., Torres J. V., Chavarría M., Delgado M., Atakishiyev A., Sarmiento y Álvarez L. J. (2012). Variability of rainfall regimes in Central Mexico, 1961-2008 (Atmósfera, enviado).
- Bolongaro-Crevenna, A., R. Sierra-Oteiza, V. Torres-Rodríguez, A. Márquez-García, J. Ramírez-Velázquez, S. Uribe-Nava, F. Castillo Hernández, R. Lagunas-Gancedo, T. Suárez-Tovar, Y. Sotelo-Pliego, B. Velasco-Vicario, y C. Monsalvo-Jiménez. (2006). Diagnóstico del Impacto y Riesgo Derivados de la Variabilidad Climática y el Cambio Climático Global en la Disponibilidad y Manejo del Agua y en la Agricultura. Análisis de la Vulnerabilidad y Capacidad de Adaptación al Cambio Climático en los Sectores más Relevantes del estado de Morelos. Instituto Nacional de Ecología. México. 181 pp.

- Bonilla-Barbosa J. y Villaseñor J. (2003). Catálogo de la Flora del Estado de Morelos. Centro de Investigaciones Biológicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 129 pp.
- Bonilla-Barbosa J., Viana-Lases J. y Salazar-Villegas F. (2000). Listados florísticos de México XX. Flora acuática de Morelos. Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 29 pp.
- Boyd E. (2008). Navigating Amazonia under uncertainty: past, present and future environmental governance. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 363: 1911–1916.
- Bradshaw A. D. (1987). The reclamation of derelict land and the ecology of ecosystems. In *Restoration Ecology*, eds. Jordan W. R., Gilpin M. E. y Aber J. D., pp. 53-74. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brattström B. (1968). Thermal acclimation in anuran amphibians as a function of latitude and altitude. *Comp. Biochem. Physiol.* 24:93-111.
- Bravo-Cadena J. (2010). Cambio climático global: efecto en algunas especies de aves en peligro en el estado de Hidalgo, México. Tesis de maestría, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Pachuca, Hidalgo, México.
- Burton I., Hug S., Lim B., Pilifosova O., Schipper E. (2002). From impact assessment to adaptation priorities: the shapping of adaptation policy. *Climate Policy*. 2:145-149 pp.
- Buzato, S.; Sazima, M. & Sazima, I. 2000 Hummingbird–pollinated floras at three Atlantic forest sites. *Biotropica* 32(4): 824-841.
- Castro-Franco R. y Bustos M. (1994). List of reptiles of Morelos, and their distribution in relation to vegetation types. *The Southwestern Naturalist*, 39: 171-175 pp.
- Claussen D. (1977). Thermal acclimation in ambystomatid salamanders. *Comparative Biochemistry Physiology*. 58:333-340 pp.
- CONABIO (1998). La diversidad Biológica de México: Estudio de País, 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México.
- CONABIO. (2009). *Capital Natural de México. Vols. I-III*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Cuernavaca, México.
- CONABIO. (2012). Convocatoria para elaborar un proyecto de compilación de información sobre especies emblemáticas nativas del estado de Morelos. www.conabio.org.mx
- CONANP. (2007). Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2007-2012.
- CONANP. (2010). Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, SEMARNAT. México. 22 pp.
- Conde C. (2006). México y el cambio climático global. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- Contreras-MacBeath T. (1995). Ecosistemas Acuáticos del estado de Morelos con énfasis en los peces. *Ciencia y Desarrollo*. 20 (122): 43-51 pp.
- Contreras-MacBeath T., Boyás J. y Jaramillo F. (eds.). (2004). La diversidad Biológica en Morelos: Estudio de Estado. CONABIO y UAEM. Comisión Nacional para el

- Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Cuernavaca, México. 156 pp.
- Contreras-MacBeath T., Jaramillo M. F. y Boyás Delgado J. C. (2006). La diversidad biológica en Morelos. Estudio del Estado. CONABIO y UAEM. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad y Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.
- DOF. (2012). Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación 6 de Junio de 2012. 44 pp.
- Duellman W. (1999). Patterns of Distribution of Amphibians A Global Perspective. Baltimore. 648 pp.
- Duellman W. y Trueb L. (1986). Biology of amphibians. McGraw-Hill. New York, EEUU. 670 pp.
- Elith J., Graham C., Anderson R., Dudik M., Ferrier S., Guisan A., Hijmans R., Huettmann F., Leathwick J., Lehmann A., Li J., Lohmann L., Loiselle B., Manion G., Moritz C., Nakamura M., Nakazawa Y., Overton M., Peterson A., Phillips S., Richardson K., Scachetti-Pereira R., Soberon J., Williams S., Wisz M., y Zimmermann N. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. *Ecography*. 29(2): 129-151 pp.
- Elith J., Phillips S., Hastie T., Dudík M., Chee Y., y Yates C. (2010). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17(1): 43-57 pp.
- FAO. (2010). Agricultura "climáticamente inteligente". Políticas, prácticas y financiación para la seguridad, adaptación y mitigación. 46 pp.
- Farías V., Téllez O., Ballesteros-Barrera C. (2010). Climate change and cactophily between bats and tetchos in Tehuacán-Cuicatlán Valley, México. *Memorias VII Simposio Internacional sobre la Flora Silvestre en Zonas Áridas*. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, México.
- Flores M., Araujo R., y Betancour E. (2003). Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para maíz de temporal en México ante el cambio climático. pp 200-210. En: México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. C. Gay (ed). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma del México y US country Studies Program. México, D.F.
- Foden W., Mace G., Vié J. C., Angulo A., Butchart S., DeVantier L., Dublin H., Gutsche A., Stuart S. y Turak E. (2008). Species susceptibility to climate change impacts. pp 12. En: The 2008 Review of The IUCN red List of Threatened Species. J.-C. Vié, C. Hilton-Taylor y S. Stuart (eds). IUCN. Gland, Suiza.
- Forbush E. (1929). *Birds of Massachusetts and other New England states*. Arno press. New York, EEUU.
- Füssel H. (2007). Adaptation planning for climate change: concepts, assessment approaches, and key lessons. *Sustainability Science*. 2:265-275 pp.
- Gay C. (comp.) (2000). México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Instituto nacional de Ecología, Universidad nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. 220 pp.

- Gitay H., Suarez A. y Watson R. (2002). *Climate change and biodiversity: IPCC Technical Paper V. Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ginebra, Suiza. 77 pp.
- Glick P., Stein B. y Edelson N. (eds). (2011). *Scanning the Conservation Horizon: A Guide to Climate Change Vulnerability Assessment*. National Wildlife Federation, Washington, D.C. 168 pp.
- Grinnell J. (1917). The niche-relationship of the California thrasher. *The Auk* 43(4): 427-433 pp.
- Guisan A. y Zimmermann E. (2000). Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological Modelling*. 135(2-3): 147-186 pp.
- Hansen A., Neilson R., Dale V., Flather C., Iverson L., Currie D., Shafer S., Cook R., y Bartlein P. (2001). Global changes in forest: Responses of species, communities and biomes. *BioScience* 51(9): 765-779 pp.
- Henle K., Dick D., Harpke A., Kühn I., Schweiger O. y Settle J. (2008). *Climate Change Impacts on European Amphibians and Reptiles. Convention on the conservation of european wildlife and natural habitats*. 51 pp.
- Hijmans R., Cameron S., Parra J., Jones P. y Jarvis A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*. 25(15): 1965-1978 pp.
- Hutchinson G. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*. 22: 415-427 pp.
- Illoldi-Rangel P., V. Sánchez-Cordero y A. Peterson. (2004). Predicting distributions of Mexican mammals using ecological niche modeling. *Journal of Mammalogy*. 85(4): 658-662 pp.
- INE. (2010a). "Glosario de términos en cambio climático". http://cambio_climatico.ine.gob.mx/glosario.html. Consultado en abril de 2012.
- INE. (2010b). "¿Cómo afecta el cambio climático a la biodiversidad?". <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/656/biodiversidad.pdf>. Consultado en julio de 2012.
- IPCC. (2000). Intergovernmental Panel on Climate Change. In: IPCC Summary for Policymakers. Emissions scenarios. A special report for IPCC Working group III. Published for Intergovernmental Panel on Climate Change. 21 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. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (Editores). Ginebra, Suiza. 104 pp.
- IPCC. (2001). "Third Assessment Report - Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis". http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm Consultado en mayo de 2012.

- Kattan G. y Naranjo L. (2008). Regiones Biodiversas: herramientas para la planificación de sistemas regionales de áreas protegidas. XCS Colombia, Fundación EcoAndina, WWF Colombia. Santiago de Cali, Colombia. 224 pp.
- Kerr J. y Kharouba H. (2007). Climate change and conservation biology. pp 190-204. En: Theoretical Ecology. May, R. y McLean, A, (eds). 3rd edition. 272 pp.
- Kirilenko A., Belotelov V. y Bogatyrev B. (2000). Global model of vegetation migration: incorporation of climatic variability. Ecological Modelling. 132:25-133.
- Lhumeau A. y Cordero D. (2012). Adaptación basada en Ecosistemas: Una respuesta al cambio climático. UICN, Quito, Ecuador. 17 pp.
- Lillywhite H. y Maderson P. (1982). Skin structure and permeability. pp 397-442. En: Biology of the Reptilia. Gans, C. y Pough F. (eds). Academic Press. New York, EEUU.
- Lillywhite H., Licht P. y Chelgren P. (1973). The role of behavioral thermoregulation in the growth energetic of the toad *Bufo boreas*. Ecology. 54:375:383 pp.
- Locatelli B., Rojas V. y Salinas Z. (2008). Impacts of payments for environmental services on local development in northern Costa Rica: A fuzzy multi-criteria analysis. Forest Policy and Economics. 10(5): 275-285 pp.
- MacArthur R. (1972). Geographical Ecology. Harper and Row, Princeton, NJ, USA. 269 pp.
- Maderey L., y Jiménez A. (2000). Alteración del ciclo hidrológico en l aparte baja de la cuenca alta del río Lerma por la transferencia de agua a la Ciudad de México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. 45: 24-38 pp.
- Magaña V., Conde C., Sánchez O. y Gay C. (1999). Evaluación de escenarios regionales de clima actual y de cambio climático futuro para México. pp 9-26. En: México: una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Gay, C. (comp) (2000). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. 220 pp.
- Magaña V., Gómez L., Neri C., Landa R y Ávila, B. (coord y eds). (2011). Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Humedales del Golfo de México. INE, SEMARNAT, WB, Gobierno de Japón, UNAM, UAM, CEGAM, S. C. México. 90 pp.
- March I., Cabral H., Echeverría Y., Bellot M. y Fausto J. (eds). (2011). Adaptación al cambio climático en áreas protegidas del Caribe de México. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, The Nature Conservancy, Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza. México. Serie Estrategias de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas de México. 109 pp.
- Markham A. (1996). Potential impacts of climate change on ecosystems: review of implications for policymakers and conservation biologists. Climate Research. 6:179-191 pp.
- Martínez, J. y Fernández A. (comps) (2004). Cambio climático: una visión desde México. Primera edición. Instituto Nacional de Ecología, México. 525 pp.

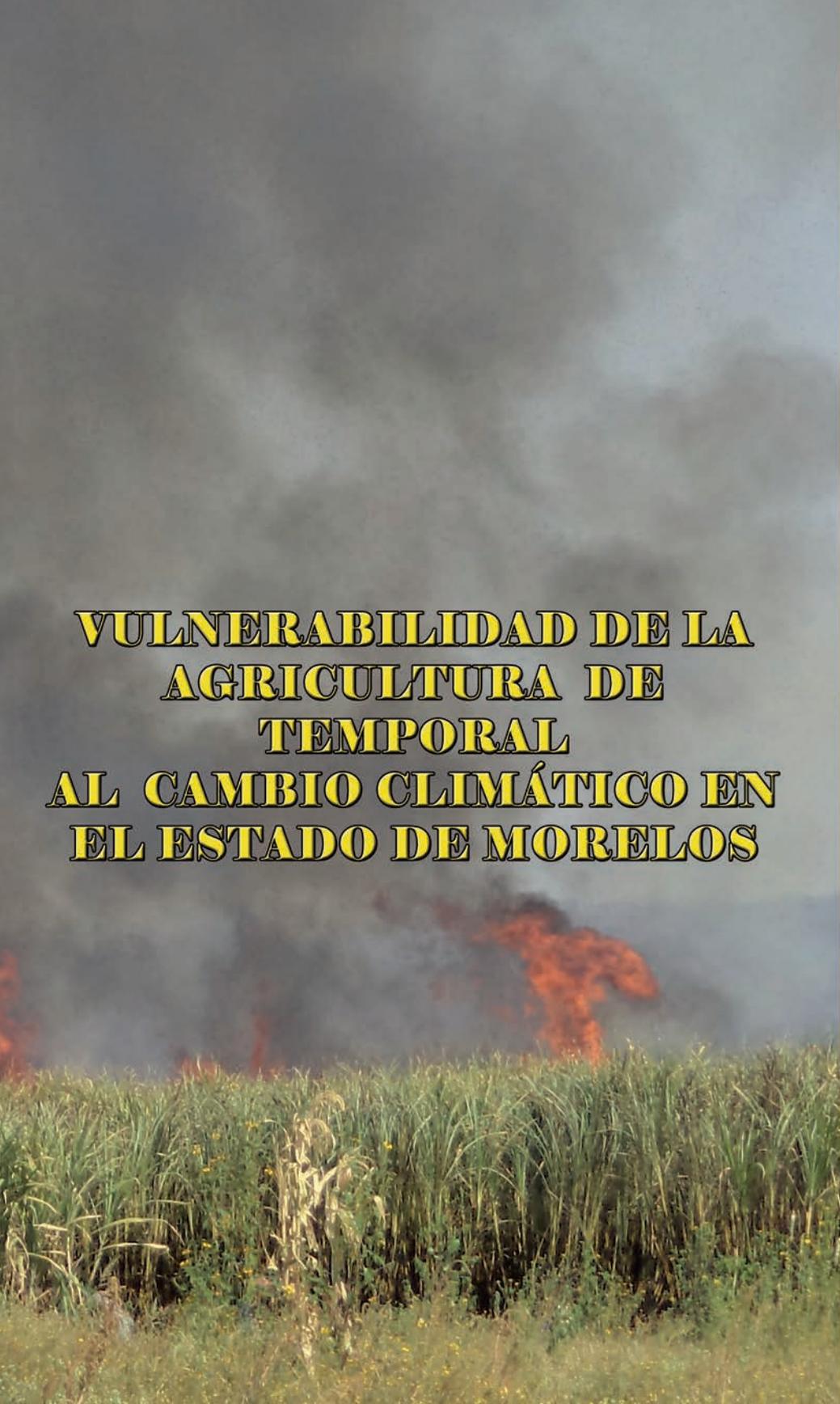
- Martínez-Alonso C., Locatelli B., Vignola R. e Imbach P. (eds). (2010). Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina. Libro de actas del Seminario Internacional sobre Adaptación al Cambio Climático: el Rol de los Servicios Ecosistémicos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Cartago, Costa Rica. 144 pp.
- Martínez-Meyer E., Townsend P. A., Hargroove W. (2004). Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for biodiversity. *Global Ecology and Biogeography*. 13:305-314 pp.
- Masera O., Ordoñez M. y Dirzo, R. (1992). Carbon Emissions from deforestation in México: Current Situation and long-term Scenarios. pp 1-49. En *Carbon Emission and Sequestration in forest: Case Studies from seven Developing Countries, Summary*. Report LBL-32665. Makundi W. y Sathaye J. (eds). Lawrence Berkeley Laboratory, University of California. Berkeley, California.
- McAllister D. (1991). What is the status of the world's coral reef fishes? *Sea Wind*. 5:14-18 pp.
- McCarthy J., Canziani O., Leary N., Dokken D. y White K. (eds.). (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press. EEUU.
- Monroy R. y Colín H. (1991). Perspectiva ecológica integral del estado de Morelos. pp 45-54. En: Medardo, T. (coord.). CRIM-UNAM. Primeras jornadas de investigación en el Estado de Morelos. 318 pp.
- Ojeda O., Aristegui F. y Pérez-Gil R. (1997). México ante el desafío del cambio climático. Documento de información. Comisión de Estudios del Sector Privado para el Desarrollo Sustentable. Consejo Coordinador Empresarial. México, D.F. 24 pp.
- Oyhantçabal W. (2010). Desarrollo de capacidad institucional adaptativa, lucha contra la sequía y servicios ecosistémicos en el norte del Uruguay. pp 97-104. En: *Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina*. Martínez-Alonso, C., Locatelli, B., Vignola, R. e Imbach P. (eds). Cartago, Costa Rica. 144 pp.
- Packard G. y Packard M. (1988). The physiological ecology of reptilian eggs and embryos. pp 523-605. En: *Biology Reptilia*. Gans, C., Huey, R. (eds). Ecology B. Defense and Life History. New York, EEUU.
- Parra-Olea G., García-París M., Papenfuss T. y Wake D. (2005). Systematics of the *Pseudoeurycea bellii* (CAUDATA: PLETHODONTIDAE) species complex. *Herpetológica* 61(2): 145-158 pp.
- Pérez Gil R., Loa-Loza E., Arroyo Quiroz I. y Ramírez R. (2010). Acciones para la puesta en marcha de la Estrategia de Conservación de la Biodiversidad del Estado de Morelos. FAUNAM AC para la CEAMA.
- Peterson A, y Holt R. (2003). Niche differentiation in Mexican birds: Using point occurrences to detect ecological innovation. *Ecology Letters*. 6(8):774-782 pp.

- Peterson A., Soberón J. y Sánchez-Cordero V. (1999). Conservatism of ecological niches in evolutionary time. *Science*. 285(5431):1265-1267 pp.
- Peterson G. y Holling C. A. (1998). Ecological resilience, biodiversity and scale. *Ecosystems*. 1:6-18 pp.
- Peterson T., Taylor M., Demeritte R., Duncombe D., Burton S., Thompson F., Porter A., Mejia M., Villegas E., Fils R., Tank A., Martis A., Warner R., Joyette A., Mills W., Alexander, B. L. y Gleason. (2002). Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Journal of Geophysical Research*. 107(4601):9 p.
- Phillips S. (2008). Transferability, sample selection bias and background data in presence-only modelling: a response to Peterson *et al.* (2007). *Ecography*. 31:272-278 pp.
- Phillips S. (2012). Maxent software for species habitat modeling. Version 3.3.3k. Princeton University. New Jersey, EEUU. Tomado de: <http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/>.
- Phillips S., Anderson R., y Schapire R. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231-259 pp.
- Phillips S., Dudík M. y Schapire R. (2004). A maximum entropy approach to species distribution modeling. En: Bratko I, Dzeroski S. (eds). *Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning*, ACM Press. New York, EEUU. 655-662 pp.
- Pianka E. (1986). *Ecology and natural history of desert lizards: analyses of the ecological niche and community structure*. Princeton University Press. Nueva Jersey, EEUU.
- Pitelka L. (1997). Plant migration and climate change. *American Scientist*. 85:464-473 pp.
- Pulliam H. (2000). On the relationship between niche and distribution. *Ecology Letters*. 3:349-361 pp.
- Ramírez-Albores J. y Ramírez-Cedillo M. (2002). Avifauna de la región oriente de la Sierra de Huautla, Morelos, México. *Anales del Instituto de Biología. Serie Zoología*. Universidad Nacional Autónoma de México. 73(1):91-111 pp.
- Ribot J. (2009). Vulnerability does not just come fall from the sky: Toward Multi-scale Pro-poor Climate Policy. pp 1-21. En: *Social Dimensions of Climate Change: Equity and Vulnerability in a Warming World*. Mearns, R. y Norton, A. (eds). The World Bank. Washington, DC. EEUU.
- Roberts G. (2008). *Polices and Instruments for the Adaptation of Forests and the Forest Sector to Impacts of Climate Change as Indicated in United Nations Framework Convention on Climate Change National Reports*. IUFRO, Viena, Austria. 119 pp.
- Rzedowski, J. (1978). *Vegetación de México*. Limusa, México.
- Sánchez G., Feria T. y Ortiz R. (2012). Simposio: Cambio climático y sus efectos en las aves en México, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Centro de Investigaciones Biológicas. Informe final, SNIBCONABIO, proyecto No. JU010. México, D. F.

- Sánchez-Cordero V., Illoldi-Rangel P., Linaje M., Sarkar S., Peterson A. (2005). Deforestation and extant distributions of Mexican endemic mammals. *Biological Conservation*. 126:465-473 pp.
- Sánchez-Cordero V., Munguía M. y Peterson A. (2004). GIS-based predictive biogeography in the context of conservation. pp. 311-323. En: *Frontiers in Biogeography: New Directions in the Geography of Nature*. Lomolino, M. y Heaney, L. (eds.). Sinauer Press. Sunderland, EEUU. 436 pp.
- Sánchez-Cordero V., Peterson A. y Pliego-Escalante P. (2001). Modelado de la distribución de especies y conservación de la diversidad biológica. pp 359-379. En: *Enfoques Contemporáneos en el Estudio de la Diversidad Biológica*. García-Aldrete, A., Alvarez, F., Hernández, H., y Ulloa, M. (eds). Ediciones Científicas universitarias, Fondo de Cultura Económica, Instituto de Biología, UNAM y Academia Mexicana de Ciencias, A.C. México, D.F. 413 pp.
- Sarakinos H., Nicholls A., Tubert A., Aggarwal A., Margules C., Sarkar S. (2001). Area prioritization for biodiversity conservation in Québec on the basis of species distributions: a preliminary analysis. *Biodiversity and Conservation* 10: 1419-1472.
- Schoener. (1989). The ecological niche. pp 79-114. En: *Ecological Concepts: The contribution of ecology to an understanding of the natural world*. Cherret, J. (ed). Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK. 385 pp.
- Segura G. (1992). Deforestación y cambio climático, en *Memorias. Reunión anual del Programa Universitario de Medio Ambiente, Vol 1, Área: Cambio Global, Sección 36*. Universidad Nacional Autónoma de México. México, DF.
- SEMARNAT. (2009a). Cambio Climático. Ciencia, evidencia y acciones. Serie ¿Y el medio ambiente?, México, 80 pp.
- SEMARNAT. (2009b). Programa Especial Cambio Climático http://www.semarnat.gob.mx/programas/Documents/PECC_DOE.pdf. Consultado en mayo de 2012.
- SEMARNAT. (2009c). Logros de la Instrumentación de la estrategia de transversalidad de políticas públicas para el desarrollo sustentable en la Administración Pública Federal (APF) en 2008. México. 55 pp.
- SEMARNAT. (2009d). Síntesis: La Economía del Cambio Climático en México. L.M. Galindo (Coord). México. 281 pp.
- Smith-Gill S. y Bervem D. (1979). Predicting amphibian metamorphosis. *Am. Nat.* 113:563-585.
- Soberón J. y Peterson A. (2005). Interpretation of models of fundamental ecological niches and species' distributional areas. *Biodiversity Informatics* 2: 1-10 pp.
- Stockwell D. y Peters D. (1999). The GARP modelling system: problems and solutions to automated spatial prediction. *International Journal of Geographical Information Science*, 13(2):143-158 pp.
- Tejeda-Martínez A. y Conde C. (2009). Guía metodológica para elaborar planes de acción estatales ante el cambio climático. UV, UNAM, INE. México.

- Thomas C., y Lennon J. (1999). Birds extend their ranges northwards. *Nature*. 399: 213 pp.
- Trejo I., Martínez-Meyer E., Sánchez S., Calixto E., Vázquez R., Villers-Ruiz L. (2011). Análisis de efecto del cambio climático en las comunidades vegetales y los mamíferos de México. *Atmosfera*. 24(1):1-14 pp.
- Turner W., Oppenheimer M. y Wilcove D. (2009). A force to fight global warming. *Nature*. Nature Publishing Group. 462:278-279 pp.
- UICN. (2008a). "Sensibilidad de las especies a los impactos del cambio climático". http://cmsdata.iucn.org/downloads/climate_change_factsheet_sp_final.pdf
Consultado en abril de 2012.
- UICN. (2008b). Lista Roja de aves del 2008: impacto del cambio climático en la nueva evaluación. Comunicado de prensa.
- UICN. (2009). "Un serio desafío". <http://www.iucn.org/es/que/climatico/>.
Consultado Mayo 2012.
- UICN. (2012). Adaptación basada en Ecosistemas: una respuesta al Cambio Climático.
- Verbruggen A., Moomaw W. y Nyboer J. (2011). Aneex 1. Glossary, Acronyms, Chemical Symbol and Prefixes. pp 953-972. En: *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona Y., Seyboth K., Matschoss P., Kadner S., Zwickel T., Eickemeier P., Hansen G., Schlömer S., von Stechow C. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1076 pp.
- Villers-Ruiz L. y Trejo-Vázquez I. (1997). Assessment of the vulnerability of forest ecosystems to climate change in Mexico. *Climate Research*. 9: 87-93 pp.
- Villers-Ruiz L. y Trejo-Vázquez I. (1998). Climate Change on Mexican Forests and Natural Protected Areas. *Global Environmental Change. Gran Bretaña*. 8(2): 141-157 pp.
- Villers-Ruiz L. y Trejo-Vázquez I. (2000). El Cambio Climático y la vegetación en México. pp 57-72. En: *México: una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México*. Gay García Carlos (Compilador). Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México, US Country Studies Program. México. 220 pp.
- Walker B. (1992). Biodiversity and ecological redundancy. *Conservation Biology*. 6:18-23 pp.
- Walker B. (1995). Conserving biological diversity through ecosystem resilience. *Conservation Biology*. 9(4): 747-752 pp.
- Warburg M. (1997). *Ecophysiology of Amphibians Inhabiting Xeric Environments*. Springer, Alemania.
- Willson M., Irvine A. y Walsh N. (1989). Vertebrate dispersal syndromes in some Australian and New Zealand plant communities, with geographic comparisons. *Biotropica*. 133-147 pp.

Wormworth J. y Mallon K. (2006). Bird species and climate change. The Global Status Report: A synthesis of current scientific understanding of anthropogenic climate change impacts on global bird species now, and projected future effects. Technical Report. Climate Risk Pty Limited (Australia), Fairlight, New South Wales.



**VULNERABILIDAD DE LA
AGRICULTURA DE
TEMPORAL
AL CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL ESTADO DE MORELOS**

5

CAPÍTULO

CAPÍTULO 5

VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA DE TEMPORAL AL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS

Abraham Rojano Aguilar^{12*}

Ronald Ernesto Ontiveros Capurata ^{13**}

Waldo Ojeda Bustamante^{14***}

Introducción

El hecho, ampliamente documentado, de cambios inminentes en varios componentes climáticos, no se ha dado sólo en la modificación de las medias estadísticas sino también en los patrones de distribución. Existen evidencias de que, como parte del cambio climático, los flujos térmicos de la atmósfera se están modificando debido a un incremento en la acumulación atmosférica de varios gases de efecto invernadero, cuyo origen es antrópico (IPCC, 2007). Así, las proyecciones futuras indican un incremento global significativo tanto de la temperatura como del bióxido de carbono. En lo que respecta a México, la mayoría de los modelos proyectan un decremento de la precipitación en la mayor parte de su territorio.

Dichas modificaciones hacen que tratemos de entender, explicar y proyectar con los recursos actuales las implicaciones globales y locales en diferentes campos de la actividad humana, tales como la agricultura. Siendo la temperatura el factor que actúa principalmente sobre el desarrollo de los cultivos, un incremento en la temperatura ambiental puede afectar su tasa de crecimiento, limitar su actividad fotosintética y aumentar su respiración (Ellis *et al.*, 1990).

El cambio climático no es un fenómeno de reciente detección, autores como Fourier, Tyndall y Arrhenius ya hace más de un siglo lo habían reportado; sin embargo, debido a la continua controversia sobre las variaciones normales de las variables físicas, químicas y biológicas ocurrientes en la tierra y la minimización de los efectos antropocéntricos en cualquiera de sus acciones, este punto ha seguido siendo uno de discusión actual, debatiéndose entre hacer algo al respecto (como, por ejemplo, con el

^{12*}Universidad Autónoma Chapingo, Km 38.5 carretera Mex-Tex. Chapingo México. CP 56230

^{13**}Universidad de la Sierra Juárez. Avenida Universidad s/n, Carretera Guelatao - Ixtlan de Juárez, Ixtlán de Juárez, Oaxaca

^{14***}Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Coordinación de Riego y Drenaje. Paseo Cuauhnahuac # 8532, Col. Progreso, Jiutepec, Mor. Mexico 62550

protocolo de Kioto), o simplemente resignarse a los desenlaces de las fuerzas naturales que amenazan a la humanidad.

El incremento de los rangos o varianzas en algunas de las variables meteorológicas fundamentales, trae como consecuencia cambios en el grado de exposición y sensibilidad al cambio climático, con implicaciones económico-sociales. Cualquiera de los casos puede estudiarse de acuerdo a los cambios cuantitativos y cualitativos en la producción de biomasa y, por ende, en la rentabilidad económica de los sistemas agrícolas. Este trabajo asume que para lograr una producción de biomasa debemos conocer, primeramente, las variables climáticas de la región que restringen el desarrollo de los cultivos.

Una vez que las regiones del mundo no están aisladas, y que los cambios globales de una variable implican modificaciones en los patrones climáticos de otras regiones, entonces no sólo se estudian los fenómenos globales, sino que poco a poco los estudios se focalizan en regiones pequeñas para determinar las estrategias y acciones más convenientes. Se ha afirmado que los impactos del cambio climático deben estudiarse localmente, dada la variabilidad espacial y temporal de sus proyecciones (Rosenzweig y Daniel, 1989).

En esta sección, dedicada a la agricultura del estado de Morelos, se muestra que la posible modificación de los patrones climáticos implica un comportamiento diferente en el desarrollo de las plantas, y si los cambios son pronunciados, varios de los cultivos actuales pueden dejar de ser rentables y desaparecer, dando lugar a una reconversión productiva. La gran diversidad de plantas, plagas y enfermedades existentes permite que algunas, por su fisiología, sean más resistentes que otras, lo que lleva a futuras configuraciones en función de la disponibilidad de recursos y condiciones ambientales.

El conocer dichos cambios con anticipación por medio de indicadores cuantificables, como es la vulnerabilidad, permite hacer planes y evaluaciones sobre el impacto de los componentes del clima y su relación con la actividad humana, no sólo de forma global sino también local, como el descrito en este trabajo para el estado de Morelos.

La vulnerabilidad es definida como una función de la exposición climática, de la sensibilidad y de la capacidad de adaptación (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2010). Primero, la exposición climática requiere identificar, medir, ordenar y analizar las variables primarias y secundarias que afectan la actividad humana, pero no sólo a cierto nivel de detalle en forma temporal sino también con una representación distribuida, como son las variables meteorológicas básicas tales como la temperatura, la radiación solar, los vientos, la humedad y la precipitación. La naturaleza cambiante de cada una de las variables en estudio genera a veces la sensación de que los cambios ocurridos pueden estar dentro de los rangos normales y por eso se recurre al concepto de anomalías, en el

que los cambios mayores a un valor permisible pueden ser una desviación estándar, las cuales se empiezan a considerar dentro de las perturbaciones sujetas a estudio. Dicha información es proporcionada por Modelos de Circulación General Acoplados (MCGA), que en forma global simulan la dinámica de la atmósfera y los procesos climáticos. En virtud de que no existe un modelo único que reproduzca confiablemente los registros de los regímenes climáticos pasados, se suele recurrir a promedios de varios modelos MCGA para proyectar a futuro la dinámica de la atmósfera.

Segundo, la sensibilidad en cada sector de la sociedad y tipo de cultivo es diferente, por lo que la modelación gradual de cada variable requiere el uso de funciones normalizadas para poder medir las respuestas de los sistemas agrícolas. El hecho de que una variable cambie en cierto grado de magnitud, de acuerdo a un modelo de circulación global en espacio y tiempo, implica efectos diferentes. En cuanto al espacio se considera la cercanía al mar, las zonas con gran vegetación o simplemente que exista una mayor consideración con la naturaleza en la actividad humana desempañada; en cuanto al tiempo se considera la sensibilidad a las condiciones iniciales, lo que significa que los puntos evaluados en el planeta pueden seguir trayectorias futuras significativamente diferentes, ya que perturbaciones arbitrariamente pequeñas de los agroecosistemas podrían llevar a un comportamiento futuro muy diferente.

Tercero, la adaptabilidad de la agricultura refleja una serie de ajustes para una amplia gama de factores, tanto dentro como fuera de los sistemas agrícolas; por ejemplo, las condiciones ambientales, como el suelo, el agua, el terreno y el clima, proporcionan limitantes y oportunidades para la producción agrícola, pero los avances tecnológicos conducen a modificaciones en la estructura y los procesos de las operaciones agrícolas. Asimismo, los factores de mercado, y las políticas públicas influyen en la naturaleza y la dinámica del sector agroalimentario.

Una vez que ninguno de los factores que afectan al sistema agrícola se mantiene constante y sus efectos son interdependientes, entonces los cambios en el tiempo representan los estímulos que afectan al éxito de las actividades agrícolas y la rapidez de los ajustes a nuevas circunstancias.

Efectos del cambio climático en la agricultura

Los impactos potenciales del cambio climático en la agricultura son muy inciertos. El gran número de estudios realizados durante los últimos años en diversos sitios alrededor del mundo muestran poco, y las conclusiones acerca de la magnitud o la dirección del impacto que seguirá en determinados países o regiones están aún en el foco de discusión.

Donde existe un aparente consenso es en el estudio de un escenario de clima único. Muchos de estos estudios se han centrado en los escenarios del Modelo de Circulación General Acoplados (MCGA), aunque éstos todavía no describen la variedad de condiciones climáticas para alguna región local en particular.

Diferentes metodologías de estimación del impacto climático también han dado resultados muy variables sobre los impactos directos en las cosechas y la producción agrícola, aun cuando el examen de la misma región y los escenarios climáticos no sean el mismo. El entorno socio-económico, la tecnología agrícola, y la base de recursos naturales también sufrirán, necesariamente, cambios profundos en los próximos cien años si la agricultura cumple con los numerosos desafíos de alimentar a la población creciente del mundo.

La conclusión que surge de los estudios de impacto por cambio climático, es que se tiene el potencial de cambiar significativamente la productividad de la agricultura en muchos lugares. Algunas áreas de alta productividad en la actualidad pueden llegar a ser mucho menos productivas, y otras áreas pueden llegar a ser improductivas, aunque, por otro lado, zonas actualmente marginales pueden beneficiarse sustancialmente.

Estudios de rendimiento de los cultivos muestran variaciones regionales de 20% a 30% —o más— en algunas áreas y pérdidas de igual tamaño en otras áreas. La mayoría de las áreas sufrirá un cambio y tendrán que adaptarse, pero la dirección del cambio, sobre todo de las precipitaciones y las adaptaciones necesarias, no puede predecirse todavía, sólo pueden proyectarse de acuerdo a posibles comportamientos de la sociedad en la producción de gases de efecto invernadero y posibles adaptaciones.

Aunque no exista confianza total, la evidencia actual sugiere que las regiones hacia los polos, donde la agricultura está limitada por la corta temporada de crecimiento, son más propensas a ganar con el cambio climático, mientras que las regiones subtropicales y tropicales son más propensas a sufrir sequías y pérdidas de productividad. Sin embargo, estas conclusiones generales no sirven de base para trazar una estrategia cuantitativa a largo plazo para la adaptación de la agricultura en forma local, por lo tanto, la política debe mantener flexibilidad para responder a medida que cambian las condiciones climáticas.

Otra cuestión es cómo son los impactos del cambio climático, en términos de producción agrícola, dentro de los otros desafíos apremiantes que enfrenta la agricultura en diferentes regiones del mundo, de acuerdo con las siguientes preguntas: ¿Es el cambio climático una amenaza menor?, ¿es probable que no se detecten los sectores agrícolas de las economías del mundo?, ¿es otro desafío fundamental para el sector agrícola el hacer frente a una población creciente, la degradación de los recursos,

mayores restricciones en los recursos disponibles, y el agotamiento de la capacidad tecnológica para ampliar la producción con la tierra existente y los recursos hídricos?

Es útil para colocar algunas de las proyecciones en el contexto de otras previsiones de futuro algunas hipótesis. Por ejemplo, si aceptamos a largo plazo las tendencias demográficas, se esperaría que después de la mayor adición de población mundial, que se dio durante la década de los años 1990, ésta se estabilizara y la investigación agrícola ya no se enfrentara al reto de aumentar la productividad para mantenerse al día con una población creciente.

Por lo tanto, es necesario realizar un análisis más específico acerca de cómo el clima va a cambiar a corto y mediano plazo, más que a largo plazo. También la construcción de escenarios climáticos proporciona una advertencia al no generar alguna respuesta al cambio climático, aparte la respuesta a las necesidades inmediatas de la agricultura. Se necesita alimentar a una población cada vez mayor, ya que en la actualidad se estima la existencia de 740 millones de personas con hambre y malnutrición.

Mantener la productividad de los recursos básicos agrícolas y satisfacer las exigencias de la agricultura para minimizar el daño al medio ambiente requiere revisar:

1. Las metodologías principales utilizadas para calcular los impactos del cambio climático de los diferentes modelos, ya que éstos conducen a estimaciones muy diferentes de los impactos.
2. Los resultados de la literatura con una amplia información sobre los estudios de rendimiento de las cosechas afectadas por el cambio climático, realizados en diferentes áreas.
3. El conjunto de estimaciones que se han realizado para la producción agrícola mundial y lo que significa para efectos de la agricultura regional.
4. El tema de la vulnerabilidad, la adición de una definición precisa al revisar algunos de los conceptos de vulnerabilidad que se han utilizado en la literatura.
5. Las cuestiones específicas de adaptación, ¿cómo puede el sistema agrícola mundial, o mejor dicho, las poblaciones altamente dependientes de la agricultura, ser menos propensos a sufrir pérdidas por el cambio climático?.

La agricultura de Morelos

La superficie cosechada en el estado de Morelos se ha mantenido en los últimos 40 años en el orden de 140 mil ha., siendo la agricultura de bajo temporal la principal modalidad agrícola, ocupando aproximadamente las dos terceras partes de la superficie cosechada (Figura 5.1).

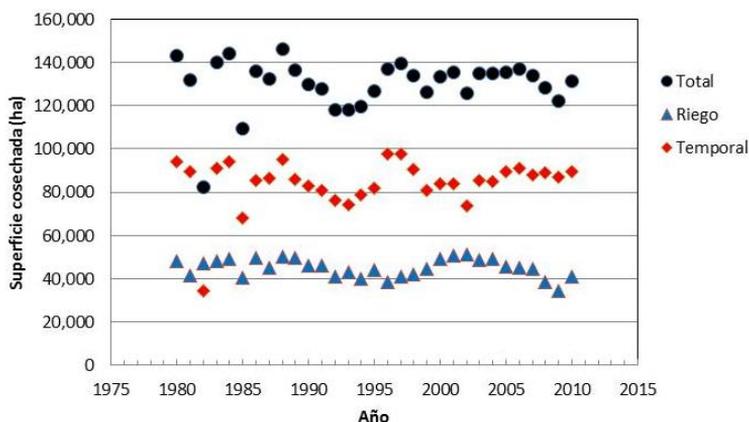


Figura 5.1. Variación anual de la superficie cosechada en Morelos por año agrícola y modalidad de riego

Las estadísticas agrícolas de los últimos años indican que el principal ciclo agrícola bajo riego en Morelos son los cultivos perennes y primavera-verano bajo temporal, el cual coincide con la temporada de lluvia, tal como se presenta en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Superficie sembrada por modalidad de riego para el promedio en el período 2002-2010

Ciclo	Promedio 2002-2010	
	Ha	%
Riego	46,516.61	34.2
Otoño-Invierno	12,620.73	9.3
Primavera-Verano	14,043.35	10.3
Perennes	19,852.53	14.6
Temporal	89,455.27	65.8
Otoño-Invierno	0	0
Primavera-Verano	78,969.23	58.1
Perennes	10,486.04	7.7
TOTAL	135,971.88	100

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la SAGARPA).

En relación a la importancia por cultivo, la caña de azúcar es el principal cultivo bajo riego; la superficie sembrada de caña de azúcar, en promedio, representa casi la tercera parte de la superficie sembrada bajo riego (Tabla 5.2).

Tabla 5.2. Superficie sembrada en hectáreas para los principales cultivos en Morelos, en la modalidad de riego promedio en el período 2002-2010

Cultivo	Promedio 2002-2010	
	Ha	%
Caña de azúcar	16,858.95	36.2
Elote	6,522.79	14
Maíz grano	4,044.68	8.7
Cebolla	3,344.01	7.2
Otros Cultivos	15,746.18	33.9
TOTAL	46,516.61	100

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA.

La productividad de la agricultura morelense bajo riego, es competitiva con respecto a la media nacional. El rendimiento de la caña de azúcar y maíz grano bajo riego están por arriba de la media nacional para riego (Tabla 5.3).

Tabla 5.3. Rendimiento de los principales cultivos de riego en Morelos en términos de la media (Ton ha⁻¹), desviación estándar (Ton ha⁻¹) y coeficiente de variación (%) para el período 2002-2010

Cultivo	Rendimiento Promedio 2002-2010	Desviación Estándar	Coficiente de Variación (%)
Caña de azúcar	117.1	7.9	6.8
Elote	29.3	2	6.9
Maíz grano	11.4	0.7	6.3
Cebolla	3.5	0.2	6.8

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA.

En cuanto a los cultivos de temporal, los cultivos de maíz y sorgo grano representan casi el 75% de la superficie sembrada de temporal (Tabla 5.4). Esta agricultura se practica en la zona semiseca del estado con una baja productividad (Tabla 5.5).

Tabla 5.4. Superficie sembrada en hectáreas para los principales cultivos de temporal promedio en el período 2002-2010

Cultivo	Promedio 2002-2010	
	Ha	%
Sorgo grano	40,842.0	45.7
Maíz grano	25,871.3	28.9
Aguacate	2,703.1	3.0
Jitomate	2,600.8	2.9
Nopal	2,420.8	2.7
Otros Cultivos	15,017.3	16.8
TOTAL	89,455.27	100

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA.

Tabla 5.5. Rendimiento de los principales cultivos de temporal en Morelos en términos de la media (Ton ha⁻¹), desviación estándar (Ton ha⁻¹) y coeficiente de variación (%) para el período 2002-2010

Cultivo	Rendimiento Promedio 2002-2010	Desviación Estándar	Coficiente de Variación (%)
Sorgo grano	4.5	0.9	21.1
Maíz grano	2.9	0.6	20.6
Aguacate	9.9	1.3	13.1
Jitomate	22.7	3.1	13.7
Nopalitos	83.8	31.3	37.3

Fuente: Elaboración propia con datos del SIAP-SAGARPA.

La figura 5.2 presenta la tendencia histórica en los rendimientos del maíz de temporal para el estado de Morelos. Se observa que en los últimos 30 años el rendimiento muestra una gran variabilidad en función de la precipitación, pero muestra una clara tendencia a la alza en el rendimiento. Las proyecciones de cambio climático de los modelos MCGA indican una disminución en la precipitación para el estado de Morelos, y ya que la agricultura de temporal es muy dependiente de la lluvia es necesario conocer el impacto en la productividad del maíz de temporal por impacto del cambio climático y, en general, la vulnerabilidad de la agricultura de temporal en el estado de Morelos.

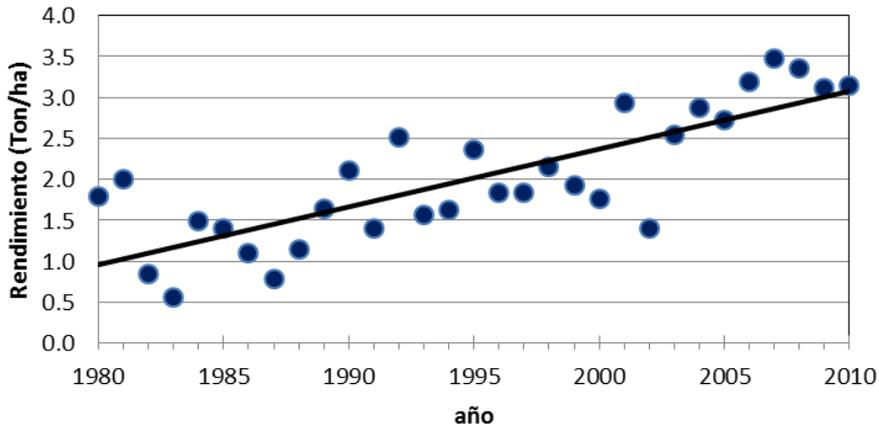


Figura 5.2. Tendencia en el rendimiento del maíz de temporal en Morelos

Marco teórico

Metodologías de evaluación

El cambio climático presenta un desafío para los investigadores que intentan cuantificar su impacto y vulnerabilidad en los sistemas agrícolas, debido a la escala global y a la diversidad de los sistemas agrícolas, y a la escala temporal en décadas. Las actuales condiciones climáticas, del suelo y socioeconómicas varían ampliamente en todo el mundo. Cada especie y etapa de cultivo tiene condiciones ambientales específicas de tolerancia, por lo que no es posible que la modelación de un sistema agrícola capture los detalles de la respuesta de los cultivos en cada lugar. La disponibilidad de datos con el detalle geográfico necesario es actualmente la principal limitación en lugar de capacidad computacional o conocimientos básicos de respuestas de los cultivos al cambio climático. Un problema específico ha sido la manera de tener el conocimiento detallado de la respuesta de las plantas en las evaluaciones regionales. En general, la mayoría de las variables a nivel nacional en México se tienen a nivel municipio, lo cual muchas veces es limitante para conocer la variabilidad espacial en municipios de grandes dimensiones.

Hay dos enfoques básicos para la evaluación de los cultivos y la respuesta de los agricultores al cambio climático: 1) modelos estructurales de la respuesta agronómica de las plantas y de las decisiones económicas/gestión de los agricultores sobre la base de las especificaciones teóricas y la evidencia experimental controlada, y 2) dependencia de la respuesta observada de los cultivos y los agricultores a mayor o menor cambio climático.

Para el primer enfoque, la estructura suficiente y los detalles son necesarios para representar a determinados cultivos y variedades de cultivos, para que las respuestas a las diferentes condiciones se encuentren a través de experimentos detallados. Detalles similares en el manejo de la agricultura permite el modelado directo de la programación de las operaciones de campo, la elección de cultivos, y cómo estas decisiones afectan a los costos y los ingresos. Estos enfoques generalmente corresponden a un modelo de cultivo representativo o de la granja, tanto en el caso de los modelos económicos de las decisiones de la parcela, como en el caso de los modelos de respuesta de los cultivos; el propósito original era mejorar la comprensión del crecimiento del cultivo y su manejo por parte del agricultor.

En el caso de los modelos de parcela, éstos sirven para ofrecerle asesoramiento normativo al agricultor en las operaciones agrícolas, aunque difieren de la maximización del beneficio (o minimización de costos) y los resultados del modelo proporcionan una guía sobre cómo los agricultores pueden mejorar la producción agrícola. En ambos casos, la representación idealizada de la cosecha y las operaciones de cultivo tienden a dar resultados que difieren notablemente de la experiencia real en las parcelas.

Esto puede reflejar el hecho de que los agricultores no funcionan como maximizadores de beneficios (que podrían mejorar su desempeño) o que los modelos no consideran algunos de los factores que el agricultor tiene en cuenta, como el riesgo o la falta de alternativas de empleo inmediato. Debido a la naturaleza idealizada de dichos modelos, muchos analistas consideran que stos proporcionan evidencia de la producción potencial o potencial de rentabilidad.

Incluir el cambio climático en estos modelos ofrece una estimación de cómo el potencial de producción puede cambiar por efectos de éste, y dichos resultados son un indicador de cómo el clima realmente afecta a la agricultura; por lo tanto, el cambio en el potencial representa el cambio de probabilidad. En muchos de los enfoques de este tipo se han utilizado modelos detallados de respuesta de cultivos que requieren registros diarios. Para los análisis de agregados debe haber relativamente pocos sitios y cultivos en grandes áreas, así como los diversos sistemas de producción, lo anterior debido a la complejidad de los modelos y la necesidad de información detallada sobre el tiempo en más de una década, de acuerdo al planteamiento básico de Fischer *et al.* (2007).

El trabajo de Leemans y Salomón (1993) se encuentra en la misma línea, la elección de representaciones mucho más simples de las interacciones cultivo/clima, pero sigue siendo relacionado con la representación agronómica básica de crecimiento de los cultivos en respuesta a la temperatura y la precipitación. La ventaja de su enfoque es que, debido a la cantidad mínima de datos climáticos requeridos (media mensual de

datos sobre temperatura y precipitación), los modelos de cultivos se pueden aplicar a una resolución de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ de latitud y longitud de mallado.

El segundo enfoque, dependiendo de la respuesta observada de los cultivos y los agricultores, la condición de algunas de las primeras estimaciones de los posibles efectos, implica observar los límites actuales del clima de los cultivos y volver a trazar los límites de un clima proyectado (Rosenzweig, 1985). En el mismo sentido, los investigadores han aplicado el análisis estadístico de datos a través de áreas geográficas de clima independiente de otros factores (calidad, suelos diferentes, variación en las condiciones económicas) que explican las diferencias de producción entre regiones, y han utilizado éstos para estimar el impacto potencial agrícola como resultado del cambio de clima (Mendelsohn *et al.*, 1994).

Una ventaja de utilizar una prueba directa de la producción se observa cuando los datos reflejan cómo los agricultores que operan bajo condiciones comerciales, y los cultivos en esas condiciones, en realidad responden a zonas geográficas de diferentes condiciones climáticas. En este caso, la obra más reciente utiliza muy pocos modelos (Mendelsohn *et al.*, 1994), aunque la estimación de modelos estructurales es lo más detallada posible. Darwin *et al.* (1995) reveló pruebas de uso de la variación geográfica en el clima en un modelo global, la asignación de uso de la producción y la entrada a clases determinadas por el clima de la tierra sobre la base de los patrones actuales de producción. Dada la disponibilidad de datos para el estado de Morelos, a continuación se presenta la metodología usada para evaluar la vulnerabilidad de la agricultura de temporal.

Análisis de vulnerabilidad

El análisis de vulnerabilidad al cambio climático se basa en la metodología propuesta por Gbetibouo y Ringler (2009), aplicada a la agricultura de riego por Ojeda-Bustamante *et al.* (2010), quienes consideran que la vulnerabilidad se expresa mediante tres componentes: exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. La suma entre la exposición y la sensibilidad al cambio representan los impactos potenciales al sistema, mientras que la capacidad de adaptación representa la capacidad del sistema para soportar dichos impactos, recuperarse o adaptarse a un cambio, por lo tanto la vulnerabilidad viene dada por:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} + \text{Sensibilidad} - \text{Capacidad de Adaptación} \quad (1)$$

Cada componente viene expresado en función de diversos indicadores, los mismos que se expresan como porcentaje de vulnerabilidad y que deben ser previamente normalizados mediante la siguiente relación:

$$X = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} * 100 \quad (2)$$

Donde X_i es el valor normalizado de los valores de la variable x_i ; x_{\min} y x_{\max} son los valores mínimo y máximo del conjunto de datos x_i ; esta relación es válida cuando la vulnerabilidad aumenta al igual que el indicador, si ocurre el caso contrario se debe restar 100 del valor obtenido por la anterior relación.

La figura 5.3 muestra el marco metodológico empleado para el análisis de vulnerabilidad en la agricultura para el estado de Morelos.



Figura 5.3. Marco metodológico para el análisis de vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático

Indicadores de vulnerabilidad

Las variables consideradas para el análisis de vulnerabilidad de la agricultura se detallan en la tabla 5.6, las mismas fueron escogidas considerando su impacto en la agricultura, la disponibilidad de datos, resolución y variabilidad espacial. Las variables están agrupadas según el componente al que pertenecen, tipo de información y la interpretación respecto a la vulnerabilidad.

La información para las variables mencionadas fue obtenida de diferentes fuentes que se detallan a continuación, así como los métodos utilizados para el tratamiento y generación de los datos espaciales.

Fuentes y tratamiento de los datos

Fuente de datos

Para el análisis de las variables que intervienen en la vulnerabilidad al cambio climático los datos fueron obtenidos de diversas fuentes. Los datos climáticos históricos fueron extraídos de la base de datos generada por Hijmans *et al.* (2005) con base en una extensa red de estaciones climatológicas en todo el mundo para el período de 1950-2000 y a una resolución de 900m.

Tabla 5.6. Variables utilizadas para el análisis de vulnerabilidad de la agricultura

	Indicador	Tipo de información	Interpretación
Exposición	Anomalías temperaturas máximas (°C)	Vectorial (puntos cada 50km)	A > Anom > Vulnerabilidad
	Anomalías temperaturas medias (°C)	Vectorial (puntos cada 50km)	A > Anom > Vulnerabilidad
	Anomalías temperaturas mínimas (°C)	Vectorial (puntos cada 50km)	A > Anom > Vulnerabilidad
	Anomalías precipitación (mm)	Vectorial (puntos cada 50km)	A > Anom > Vulnerabilidad
	Anomalías índice estandarizado de precipitación (SPI)	Vectorial (puntos cada 50km)	A > Anom > Vulnerabilidad
Sensibilidad	Diversidad de cultivos (%)	Vectorial (municipal)	A > Diversidad < Vulnerabilidad
	Tamaño de parcela (ha/UP)	Vectorial (municipal)	A > Tamaño > Vulnerabilidad
	Población rural (%)	Vectorial (municipal)	A > Pobl rural > Vulnerabilidad
	Uso de fertilizantes (%)	Vectorial (municipal)	A > Uso fert < Vulnerabilidad
	Variabilidad de la precipitación (mm)	Vectorial (puntos cada 50 km)	A > Var precip > Vulnerabilidad
	Variabilidad en rendimiento (%)	Vectorial (municipal)	A > Var Rend > Vulnerabilidad
	Suelos degradados	Vectorial (polígonos Serie III INEGI)	A > Suelos degradados > Vulnerabilidad
	Evapotranspiración de referencia anual acumulada (mm)	Ráster (900 m x 900m)	A > ET > Vulnerabilidad
Capacidad de Adaptación	Índice de Marginación (%)	Vectorial (datos por localidad)	A > I. marg. > Vulnerabilidad
	Índice de Analfabetismo (%)	Vectorial (datos por localidad)	A > I. analf. > Vulnerabilidad
	Acceso a centros urbanos (min)	Vectorial (carreteras y localidades)	A > Tiempo > Vulnerabilidad
	Cobertura de servicios básicos (%)	Vectorial (municipal)	A > Cober servicios < Vulnerabilidad
	Número de dependientes económicos	Vectorial (municipal)	A > Num. depend. > Vulnerabilidad
	Ingresos por agricultura (%)	Vectorial (municipal)	A > Ingr Agri. > Vulnerabilidad
	Mecanización agrícola (%)	Vectorial (municipal)	A > Mecanización < Vulnerabilidad
	Cobertura de crédito (%)	Vectorial (municipal)	A > Cob crédito < Vulnerabilidad

Las proyecciones de las anomalías climáticas fueron generadas para el escenario A2 de la base de datos del IPCC (2010) y de la base de datos generada por Montero y Pérez (2008) para México a una resolución de 50km. Los datos municipales para los diferentes indicadores fueron tomados del Censo Agrícola, publicado por INEGI, los índices de marginación y analfabetismo de la publicación de la CONAPO (2005) y las estadísticas referidas a cultivos y superficie agrícola del Sistema de Información Agrícola y Pecuaria (SIAP, 2009); los datos de evapotranspiración potencial fueron tomados de la base de datos generada por Trabucco y Zomer (2009) a una resolución de 900m.

La información de uso de suelo (Serie III) escala 1:250000 (1998), el Modelo Elevaciones Mexicano a 30 m (2000), y los límites político administrativos, poblaciones y toponimia básica para el estado de Morelos, fueron obtenidos del INEGI.

Las capas de información espacial fueron adaptadas, corregidas y unificadas a un mismo sistema de proyección y coordenadas utilizando el Software ARCGIS 9x®. El sistema de proyección utilizado fue el Universal Transversal de Mercator (UTM) para la Zona 14 N con el Elipsoide WGS1984 y Datum WGS84.

Generación de información espacial

La resolución espacial de las bases de datos consultadas va desde 900m a 50km y en algunas variables a nivel de municipio o localidad. Para el análisis a nivel del estado de Morelos se optó por el incremento de nivel de detalle a una resolución de 30m, para lo cual se consideraron otras fuentes de información adicionales y técnicas geo estadísticas de regresión e interpolación espacial; de esta manera toda la información geográfica generada fue llevada a esta resolución antes de proceder con el análisis.

Climatología histórica

La información climática histórica generada por Hijmans (2005) fue comparada con los datos registrados en las estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Morelos. Para obtener la resolución requerida se generaron modelos lineales entre los datos extraídos de temperaturas medias, mínimas y máximas y el modelo de elevación digital de la información espacial. La información de precipitación fue generada a partir de la interpolación espacial mediante el método de remuestreo "bilinear", con el que se obtuvo una resolución de 30m.

Índices de exposición al cambio climático. Proyección de anomalías climáticas

Las anomalías climáticas fueron proyectadas para el período 2071-2098 a partir de 23 Modelos Generales de Circulación Atmosférica (MGCA) y posteriormente regionalizados para ser utilizados a escala nacional por Montero y Pérez (2008) a una

resolución de 50km x 50km. Con estos datos se generaron superficies homogéneas a una resolución de 30m, utilizando modelos de interpolación espacial como “spline” y “polinomial” mediante el módulo de análisis geo estadístico con el que cuenta el software ARCGIS 9x. Las superficies resultantes fueron finalmente normalizadas con la ecuación (2) mediante álgebra de mapas.

Índices de sensibilidad climática

Los índices de sensibilidad climática se refieren al grado en que un sistema agrícola responde a los cambios climáticos; los indicadores más importantes de sensibilidad en la agricultura se refieren a los aspectos relacionados con la producción agrícola. En las variables consideradas en este trabajo, la mayor parte de los datos se encuentran distribuidos a nivel municipal. A continuación se explican el tratamiento de los datos para las variables consideradas:

Diversidad de cultivos. El índice de diversidad de cultivos (I_d) es una variable adimensional obtenida para cada municipio a partir de la siguiente relación propuesta por Magurran (1988):

$$I_d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N A_i^2}{A_t^2} \quad (3)$$

Donde A_i es el área cosechada del cultivo i en ha, A_t es el área total cosechada en la zona agrícola de interés en ha, y N es el número de cultivos reportados; el índice expresa el grado de diversidad de cultivos por cada municipio. Las variables con datos a nivel municipal fueron inicialmente normalizadas según la ecuación (2) y posteriormente convertidas a formato ráster a una resolución de 30m.

Para el caso de las variables que no tienen distribución municipal se realizó otro tratamiento. Los datos de variabilidad de la precipitación fueron interpolados mediante el método “spline” para obtener una superficie a 30m de resolución; los suelos degradados fueron convertidos de su formato de polígono a ráster con un tamaño de pixel de 30m. Finalmente, la evapotranspiración de referencia fue correlacionada con la altura, y de manera similar que los datos de temperatura en climatología histórica, se utilizó un modelo de regresión lineal con el Modelo Digital de Elevación como variable independiente. Cabe resaltar que para el caso de estas últimas variables la normalización se realizó sobre la capa con formato ráster según la ecuación (2) mediante álgebra de mapas.

Índices de capacidad de adaptación

De igual manera que para los índices de sensibilidad se utilizaron los datos a nivel municipal, estos datos fueron inicialmente normalizados según la ecuación (2) y

posteriormente convertidos a formato ráster. En algunos de los indicadores existen datos a nivel localidad, lo que permitió contar con mejor resolución y mayor detalle, es el caso del índice de marginación y analfabetismo; en estos casos se utilizó el método de interpolación espacial “spline” para generar los datos a 30m de resolución; finalmente estas capas fueron normalizadas según la ecuación (2) mediante álgebra de mapas.

Para el caso de “Acceso a Centros Urbanos” fue necesario generar nuestros propios datos, ya que no se cuenta con información de otras fuentes al nivel de detalle requerido. Para esto se utilizaron las herramientas de análisis espacial “costo-distancia” y “distancia-ruta” de ARCGIS 9x (ESRI, 2011), a fin de generar una superficie a 30m de resolución que muestre el costo (expresado en tiempo) para trasladarse de cualquier ubicación al centro poblado más cercano a través de las carreteras existentes dentro del estado de Morelos. Esta capa fue normalizada al igual que los demás indicadores según la ecuación (2) mediante álgebra de mapas.

Exposición, sensibilidad, capacidad de adaptación y vulnerabilidad global

Para obtener los mapas de exposición (E), sensibilidad (S) y capacidad de adaptación (CA) globales, se utilizó la siguiente expresión:

$$E, S, CA = \sum_{j=1}^n P_j X_j \quad (4)$$

Donde P_j es el peso o factor de ponderación y X_j es el mapa con los valores normalizados del indicador j para estimar los componentes de vulnerabilidad. Los valores de P_j son estimados para cada indicador de acuerdo a la siguiente relación propuesta por Lyengar y Sudarshan (1982):

$$P_i = \frac{1/\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}}{c} \quad c = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{\text{var}_i(X_{i,j})}} \quad (5)$$

Este método garantiza que la variabilidad individual de cada indicador no influya sobre los pesos ponderados de los demás indicadores.

La vulnerabilidad global se calcula a través de la suma de los componentes de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación según la ecuación (1); se debe tomar en cuenta que para sumar el componente de capacidad de adaptación, primeramente se deben transformar los datos de manera que a mayor vulnerabilidad corresponda el menor valor y viceversa, ya que este componente en realidad reduce la vulnerabilidad del sistema que es afectado por el cambio climático, esto se logra invirtiendo los valores obtenidos en el mapa de capacidad de adaptación global.

Finalmente se asigna un peso de igual magnitud a cada uno de los componentes, asumiendo que todos influyen de igual manera, así cada componente recibe 1/3 como factor de ponderación y la relación para el cálculo de la vulnerabilidad total queda definida como:

$$V = \frac{1}{3}E + \frac{1}{3}S + \frac{1}{3}CA \quad (6)$$

Donde E, S y CA son los mapas normalizados de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación globales, respectivamente.

Análisis de vulnerabilidad bajo el enfoque de escenarios. Caso cultivo de maíz

El cultivo de maíz representa cerca del 10% de la producción agrícola total del estado de Morelos (SIAP, 2011). Con más de 2,000 hectáreas es el cultivo de mayor importancia del período de PV (junio-octubre), superado únicamente por el cultivo de caña (60% de la producción total) considerado como cultivo perenne. La siembra de maíz inicia durante la segunda semana de junio y la cosecha termina entre la última semana de octubre y la primera de noviembre.

Para el análisis de escenarios se utilizaron los requerimientos agroclimáticos del cultivo de maíz extraídos de varias fuentes (Ortiz, 1987; Flores *et al.*, 2000; Reyes, 1990) para definir los límites bajo los cuales sería factible el desarrollo del cultivo. De esta manera se dividió el estado de Morelos en cinco zonas, las que corresponden a zonas no adecuadas (NA), adecuada con limitaciones (AL), moderadamente adecuadas (MA) y adecuadas (A) para el cultivo de maíz. Los valores críticos que determinan las zonas fueron obtenidos de Monterroso *et al.* (2011) y se detallan en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Requerimientos para zonificar el potencial productivo del cultivo de maíz

Zonas	Requerimientos			
	Temperatura media (°C)	Precipitación anual (mm)	Periodo de crecimiento (días)	Pendiente (%)
NA	<14 >40	<300 >1600	<90	>30
AL	14-18 32-39	300-500 1200-1600	90-119 285-365	16-30
MA	18-22 26-32	500-600 900-1200	120-150 225-284	8-16
A	22-26	600-900	150-224	0-8

El período de crecimiento fue obtenido mediante la ecuación (7), propuesta por Ortiz (1987), en la que el período de crecimiento depende únicamente de la precipitación anual acumulada:

$$GP = 0.24089 (P) - 0.0000372 *(P^2) - 33.1019 \quad (7)$$

De esta manera, a partir del análisis espacial en el programa ARCGIS 9x fue posible obtener la zonificación actual para el cultivo de maíz en el estado de Morelos, el cual sirvió de base para el análisis de escenarios.

A partir de las anomalías climáticas de temperatura y precipitación generadas con base en los 23 modelos de circulación general obtenidos por Montero y Pérez (2008) para el período 2041-2098 según el escenario A2, se generó la zonificación para el cultivo de maíz para el período 2041-2098.

Los valores de anomalías de temperatura fueron adicionados a los de climatología histórica, obtenidos en el capítulo anterior, para contar con el mapa de temperaturas para el período estudiado (2041-2098); de igual manera, los valores de anomalías de precipitación fueron sustraídos de la precipitación total considerada en climatología histórica. Con esta serie de datos, representando el nuevo escenario A2 para el período 2041-2098, se obtuvo una nueva zonificación del estado, se observaron las diferencias y se cuantificaron las áreas obtenidas en ambos casos para el análisis de tendencias.

Climatología histórica

La comparación de los datos climáticos históricos extraídos de la base de datos generada por Hijmans *et al.* (2005) y los datos de las 68 estaciones meteorológicas ubicadas en el estado de Morelos consultadas mediante el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III) (IMTA, 2008), muestran los resultados que indican una alta correlación para los valores de temperaturas medias y máximas (Figura 5.4).

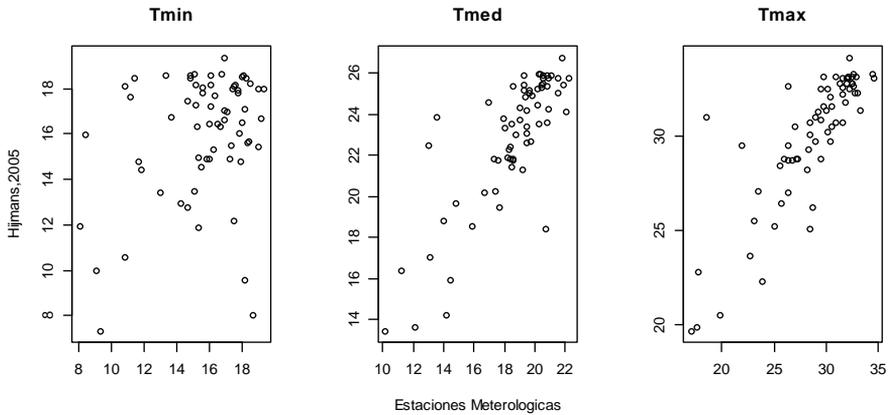


Figura 5.4. Comparación entre los valores generados por Hijmans *et al.* (2005) y los valores registrados por las estaciones meteorológicas del estado de Morelos para temperaturas máximas, medias y mínimas

Se observa una alta correlación entre los valores de temperatura media y máxima, y poca correlación entre temperaturas mínimas; esto puede deberse a datos incorrectos en la ubicación y altura de las estaciones que son reportados en ERIC III; sin embargo, puede considerarse como aceptable dada la variabilidad observada en el estado. El análisis de las diferencias entre ambas series de datos se muestra en la tabla 5.8, en donde la diferencia y variabilidad media muestran diferencias pequeñas en cuanto a temperaturas máximas y medias.

Tabla 5.8. Diferencia y variabilidad media entre la base de datos generada por Hijmans *et al.* (2005) y las estaciones meteorológicas administradas por el SMN- ERIC III

68 Estaciones		Tmed (°C)	Tmin (°C)	Tmax (°C)	Precip (mm)
	Diferencia	-1.353	-4.294	-0.300	38.388
Variabilidad	2.256	1.840	3.166	124.550	

Fuente: información obtenida de IMTA, 2008.

Para generar la información espacial a una resolución de 30m se realizaron regresiones lineales entre los datos de altura y cada una de las variables (temperaturas máximas, mínima y media) a partir de la generación de 1040 puntos aleatorios generados sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) proporcionado por el INEGI (2011). La figura 5.5 muestra la regresión entre los datos de temperatura generados por Hijmans *et al.* (2005), los valores de altura y la ecuación de regresión que permiten estimar la temperatura para cualquier valor de altura.

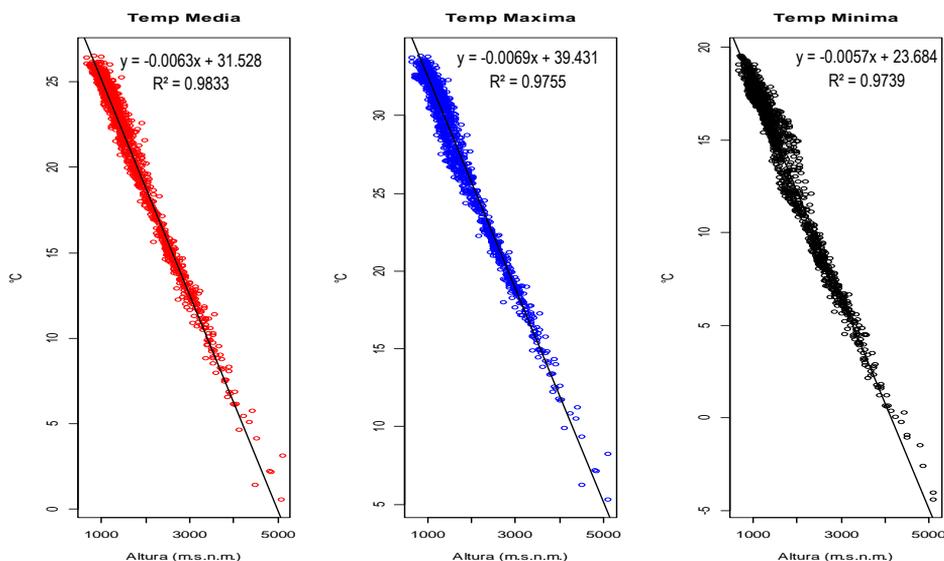


Figura 5.5. Regresión entre datos de altura proporcionados por el INEGI (2011), y datos de temperatura media, máxima y mínima generados por Hijmans *et al.* (2005) para los 1040 puntos aleatorios de la zona de estudio

De esta manera, las ecuaciones de regresión son aplicadas al MDE mediante un algoritmo de matemática de mapas para obtener los ráster de temperaturas media, mínima y máxima a 30m de resolución.

La precipitación no tiene relación directa con la altura, en ese sentido se optó por reducir la resolución mediante un método de remuestreo, aunque cabe resaltar que este método no permite mejorar la precisión de los datos. Los resultados de estos análisis se muestran en el mapa de climatología histórica en la figura 5.6, en la que se observa la variabilidad espacial de las temperaturas y precipitación en el estado de Morelos.

Las temperaturas más bajas se concentran en la parte norte a lo largo de la Sierra del Chichinautzin y se incrementan a medida que se desciende en altura hasta llegar a los valles y quebradas ubicadas en el sur. Esta diferencia de altura ocasiona una oscilación térmica que va desde los 0°C hasta los 26°C en las temperaturas medias, de -4°C a 12°C en temperaturas mínimas, y de 5°C a 35°C en las temperaturas máximas. La precipitación tiene una variación espacial que depende de la exposición pendiente y el flujo de masas de aire caliente. En las inmediaciones de la Sierra del Chichinautzin la precipitación puede llegar a 1420mm anuales, mientras que en el centro oscilan entre los 640mm y los 1120mm.

Índices de exposición

A partir de métodos de interpolación geo estadística y los datos de la base de datos climática, se obtuvieron los ráster a una resolución de 30m para las anomalías de temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura media, precipitación anual y el índice estandarizado de precipitación (SPI), para el período de junio a octubre. Los resultados se muestran en el mapa de Anomalías climáticas en las figuras 5.7 y 5.8, donde se observa que predomina un incremento de temperaturas máximas y medias más pronunciado hacia la parte sur, mientras que para el caso de temperaturas mínimas el mayor incremento ocurre hacia la Sierra del Chichinautzin, esto podría suponer que el aumento en temperaturas mínimas sería más beneficioso para los cultivos que se encuentran en las alturas de la Sierra, aunque el efecto será más dañino para los cultivos del sur si se consideran las temperaturas máximas y medias. En contraste con lo anterior, la precipitación disminuirá en mayor proporción hacia el suroeste (-104 mm) y con menor intensidad en el norte a lo largo de la sierra (-93 mm), esto indica posibles sequías en el sur y sureste. Si consideramos el índice estandarizado de sequía (SPI) la tendencia de disminución de la cantidad de humedad es de mayor intensidad hacia el sureste que en el resto del Estado, sobre todo la parte colindante al estado de Puebla. Esto coincide con los demás parámetros climáticos analizados.

De la misma manera, en las figuras 5.9 y 5.10 se presentan los mapas normalizados de las anomalías climáticas que representan el componente de exposición de la vulnerabilidad del sistema, los valores más altos representan mayor vulnerabilidad. Los valores estandarizados de vulnerabilidad para cada uno de los parámetros reflejan una tendencia de mayor vulnerabilidad hacia el sur en los límites con el estado de Puebla y Guerrero, excepto para el caso de la temperatura mínima donde la mayor vulnerabilidad se mueve hacia el norte en los límites con el Distrito Federal; sin embargo, esto último es discutible si consideramos a este parámetro desde otro punto vista, por ejemplo, un incremento de temperatura mínimas podría mejorar las condiciones para el crecimiento de cultivos actualmente muy limitada por las bajas temperaturas, de ser así, las mejores condiciones y de menor vulnerabilidad serían la parte donde el incremento de temperaturas es menor y no mayor, pero para efectos de este estudio se asume que un incremento de temperatura traerá un resultado negativo en los cultivos.

Únicamente en el caso de precipitación, la mayor vulnerabilidad se desplaza hacia el límite con el estado de Guerrero, pero de forma similar con los otros parámetros, la tendencia apunta a que la región sur es la más vulnerable al cambio climático.

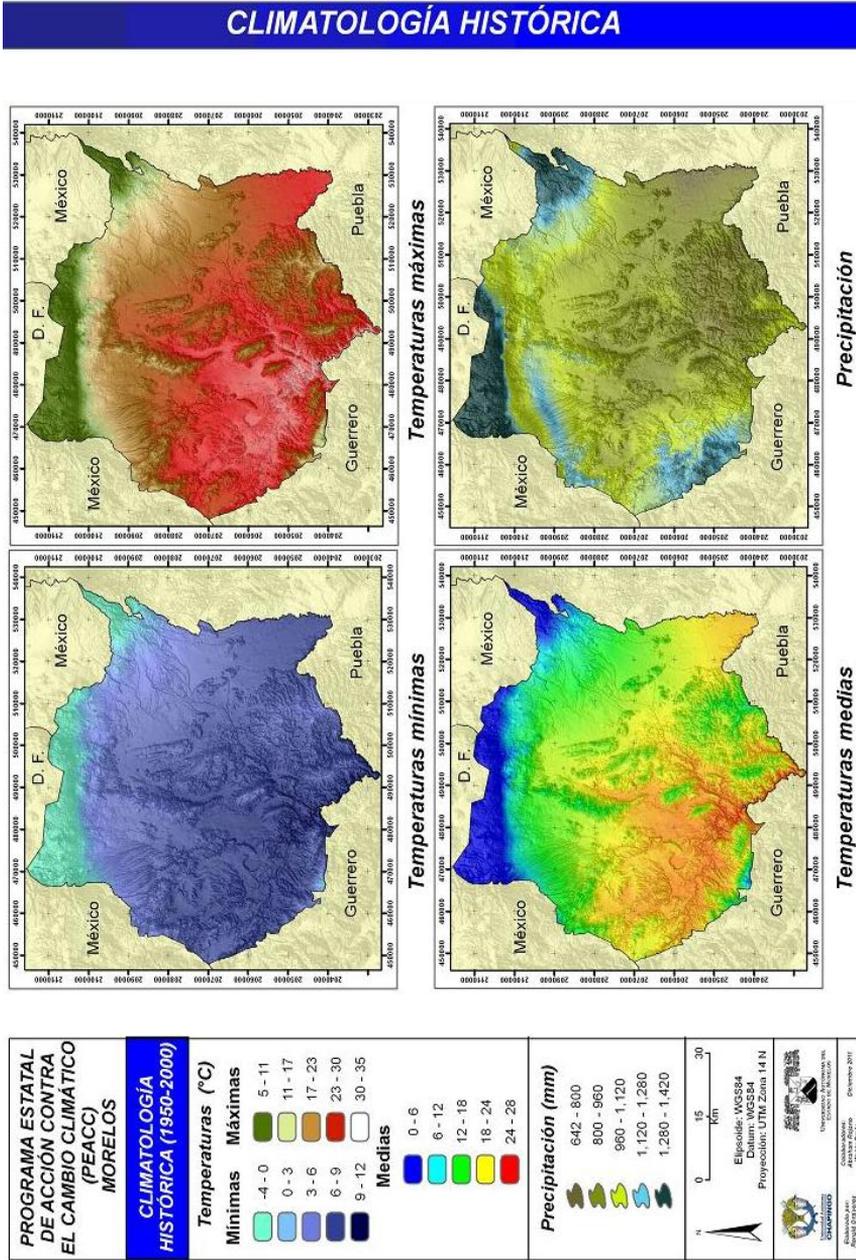


Figura 5.6. Climatología histórica (1950-2000) del estado de Morelos

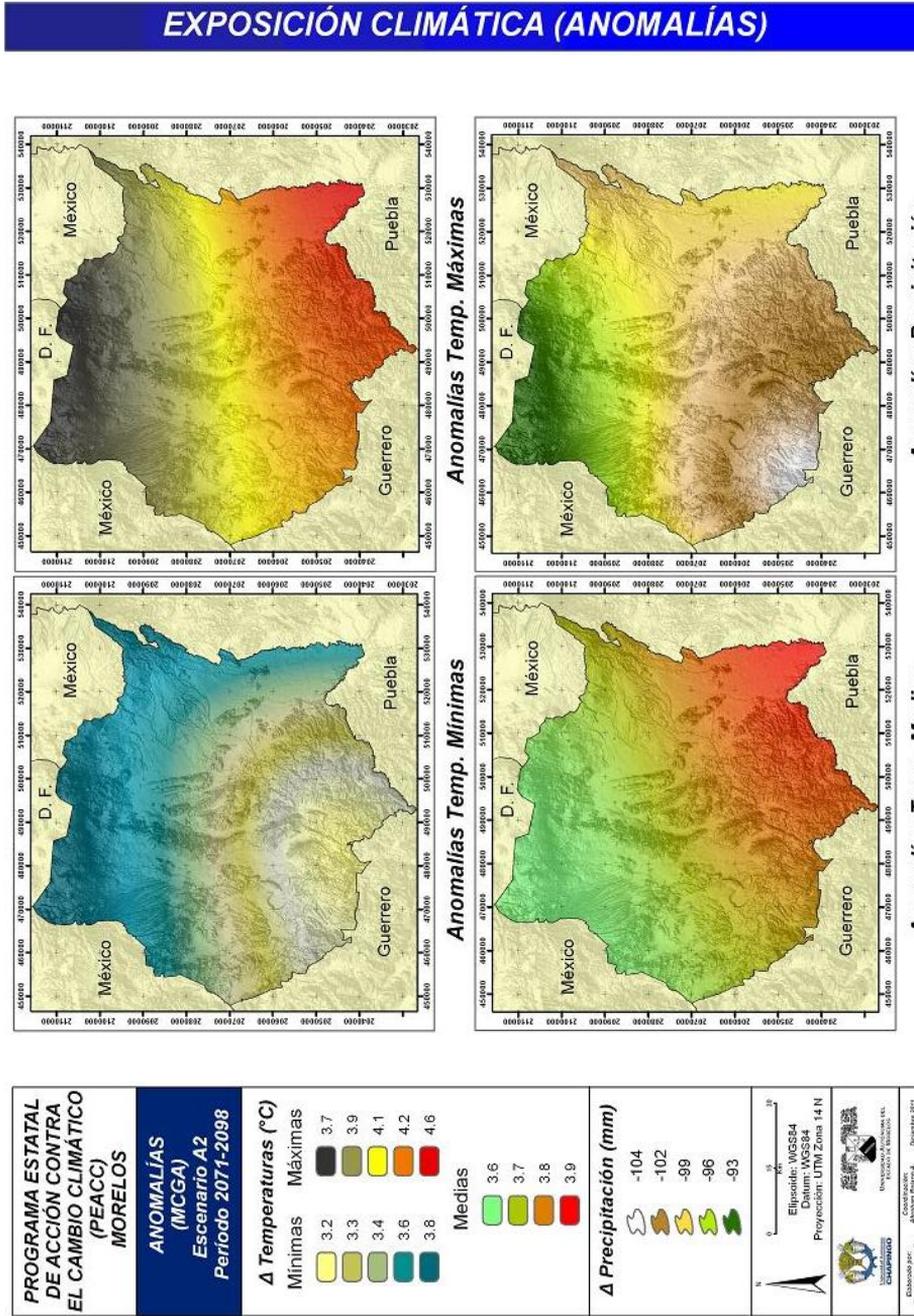
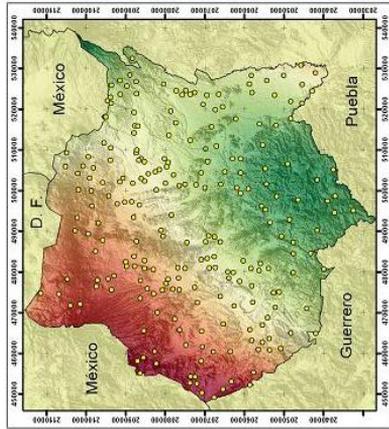
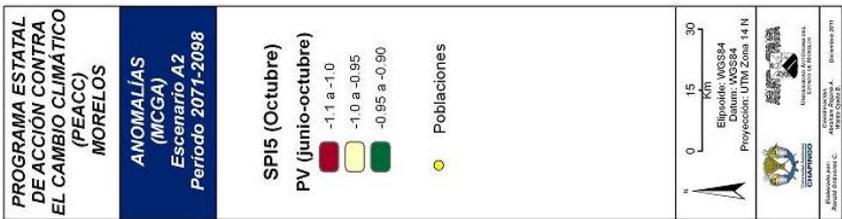


Figura 5.7. Anomalías climáticas. Escenario A2, período (2071-2098). Estado de Morelos

EXPOSICIÓN CLIMÁTICA (ANOMALÍAS)



Anomalías SPI5 (Octubre)

Figura 5.8. Anomalías climáticas. Escenario A2, período (2041-2098). Estado de Morelos (continuación).

EXPOSICIÓN CLIMÁTICA (ANOMALÍAS)

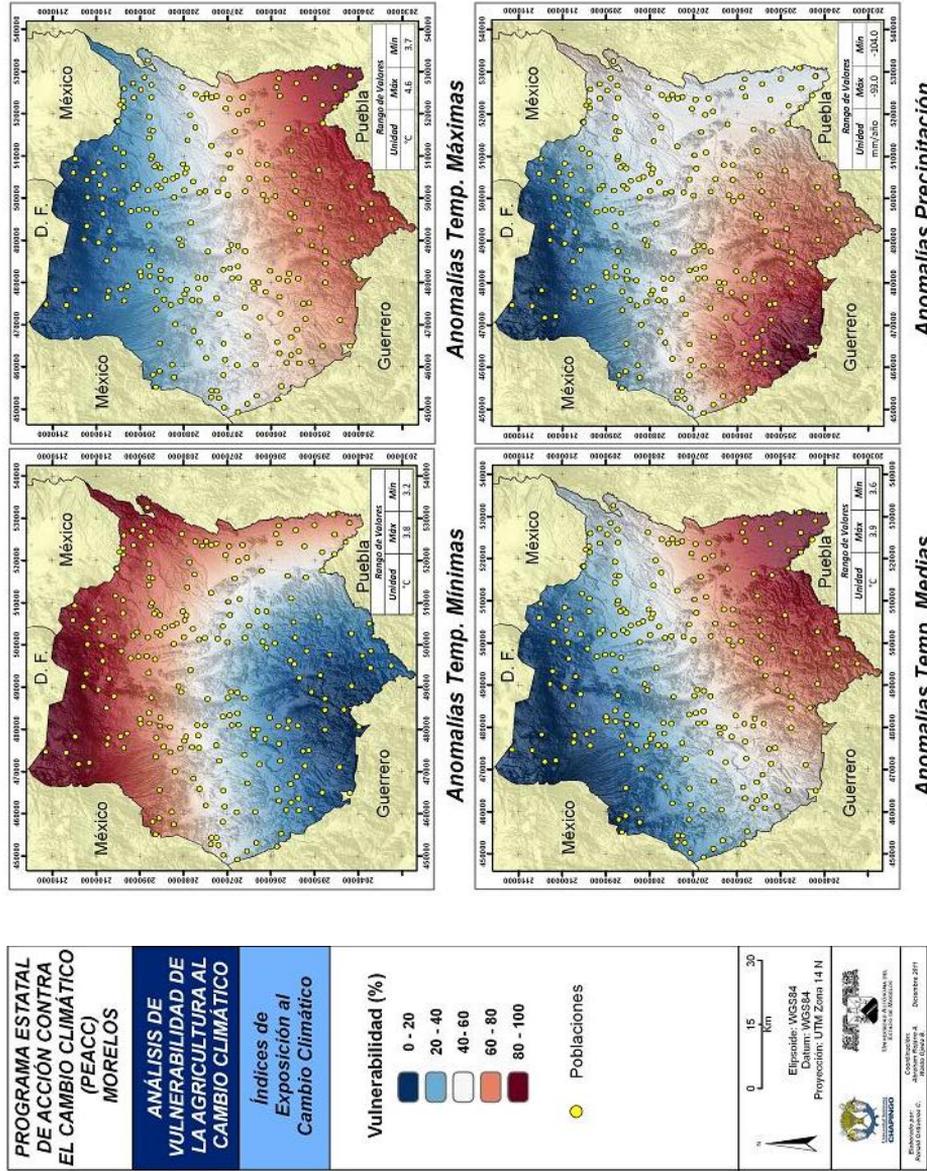


Figura 5.9. Índices de exposición al cambio climático en el estado de Morelos

EXPOSICIÓN CLIMÁTICA (ANOMALÍAS)

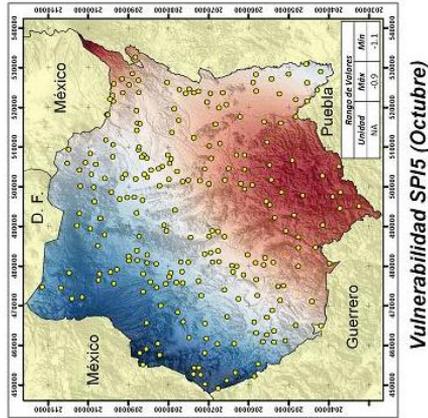
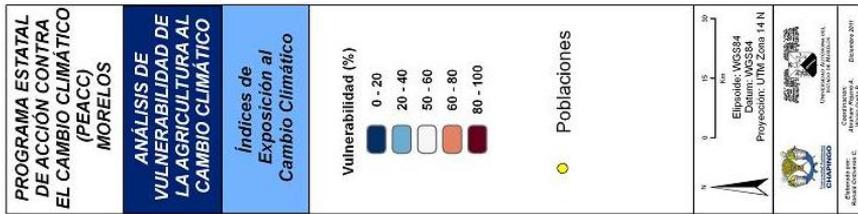


Figura 5.10. Índices de exposición al cambio climático en el estado de Morelos (continuación).

Índices de sensibilidad

El incremento de la reducción espacial de los datos de evapotranspiración fue realizado a partir de una regresión lineal entre los datos de altura de 1040 puntos aleatorios generados sobre el Modelo Digital de Elevación (MDE) proporcionado por el INEGI (2011) y los datos de evapotranspiración obtenidos por Trabucco *et al.* (2009). Los resultados se muestran en la figura 5.11.

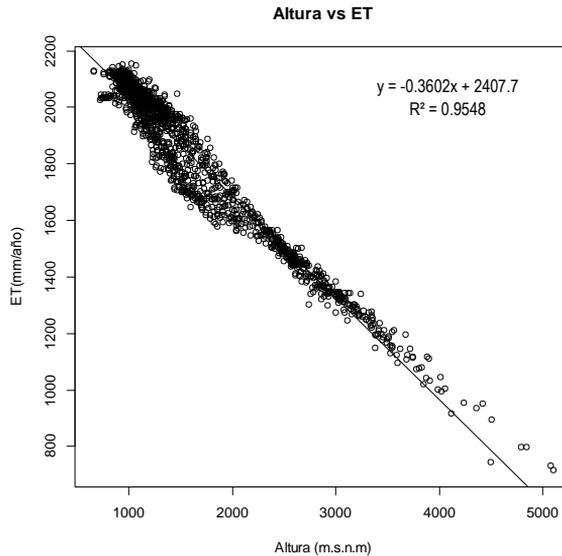


Figura 5.11. Regresión lineal entre altura y evapotranspiración potencial para los 1040 puntos aleatorios generados sobre el MDE y la capa generada por Trabucco *et al.* (2009).

La ecuación de regresión es aplicada al MDE mediante un algoritmo de álgebra de mapas para obtener un ráster de ET a 30m de resolución. Los mapas que corresponden a los índices de sensibilidad normalizados se muestran en las figuras 5.12 y 5.13 e indican el grado de vulnerabilidad para el estado de Morelos según los diferentes indicadores.

Según la diversidad de cultivos, los municipios más vulnerables se ubican en el sur del estado en los límites con el estado de Puebla, donde el índice de diversidad es de 0.8 en comparación con los municipios del centro y norte donde el índice es de 0.1. Con referencia al tamaño de parcela, los municipios más vulnerables se ubican al este en los límites con el estado Puebla en las inmediaciones del volcán Popocatepetl y en el norte, en la Sierra del Chichinautzin, en los municipios de Tlayacapan, Tlalnepantla, Tetela del Volcán, Ocuilco y en algunos del centro como Emiliano Zapata y Zacatepec de Hidalgo, donde el tamaño promedio de las parcelas agrícolas es de 0.6 has/u prod.

Las zonas menos vulnerables, y por tanto con mayor superficie por parcela, se ubican en los límites con el estado de Guerrero en el municipio de Tlaquiltenango con 8.6 has/u prod. Según la población rural, la región más vulnerable es la que presenta un alto porcentaje de su población como rural, los municipios de Tetecala, Mazatepec, Coatlan del Río, Zacualpan de Amilpas, Ocuituco, Jatetelco y Tlanepantla, coinciden con los municipios más alejados de los centros urbanos más importantes donde la vulnerabilidad según este indicador es mínima. Según el uso de fertilizantes, los municipios más vulnerables son Tlaquiltenango, Jojutla, Tlanepantla, Tepoztlán y Tetela del Volcán que presentan un menor porcentaje de uso de fertilizantes (36%) comparado con otros municipios que tienen hasta 86%.

La vulnerabilidad según la variabilidad en el rendimiento es mayor para los municipios de Tepalcingo, Miacatlán y Jiutepec, que presentan menor variabilidad en el rendimiento (0.3 ton/ha) en comparación con los demás municipios que alcanzan valores de hasta 1.7 ton/ha. La vulnerabilidad según la evapotranspiración potencial sigue la misma tendencia de la temperatura, mucho mayor en las partes bajas y menor en la Sierra del Chichinautzin, mientras que la variabilidad de la precipitación presenta mayor vulnerabilidad en la región sur del estado en los límites con el estado de Guerrero. Respecto a los suelos degradados, el INEGI reporta pocas zonas con problemas de erosión de suelos que corresponden en gran parte a la región noroeste del estado en los límites con el Estado de México.

Índices de capacidad de adaptación

Los datos municipales en formato vectorial (polígonos), previamente normalizados, fueron convertidos a formato ráster a una resolución de 30m mediante herramientas de análisis espacial en ARCGIS 9x; aquellos datos en formato vectorial de puntos como índices de marginación y analfabetismo se interpolaron para generar una superficie a 30 m de resolución. Los resultados se muestran en los mapas de vulnerabilidad de las figuras 5.14 a 5.16. La mayor vulnerabilidad en el estado se concentra cerca de las poblaciones con alto índice de marginación y analfabetismo, tal como se ve en la figura 5.11. Estas zonas se ubican con mayor frecuencia en la región sur del estado, en los límites con el estado de Puebla, y una menor vulnerabilidad hacia el centro, donde se ubican los centros urbanos más importantes. Según los datos de cobertura de crédito, la región oeste del estado, cerca de los límites con el Estado de México, es la más vulnerable ya que presenta la menor cobertura de crédito, cerca del 2%, en comparación con los demás municipios donde la cobertura alcanza hasta el 40%. Un comportamiento similar se observa para los datos de ingreso obtenidos a partir de la agricultura, los municipios más vulnerables se encuentran en la región oeste cerca a los límites del Estado de México y presentan los valores más altos, con niveles de ingreso a partir de la agricultura (98%), en comparación con los demás que llegan hasta 2%.

SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

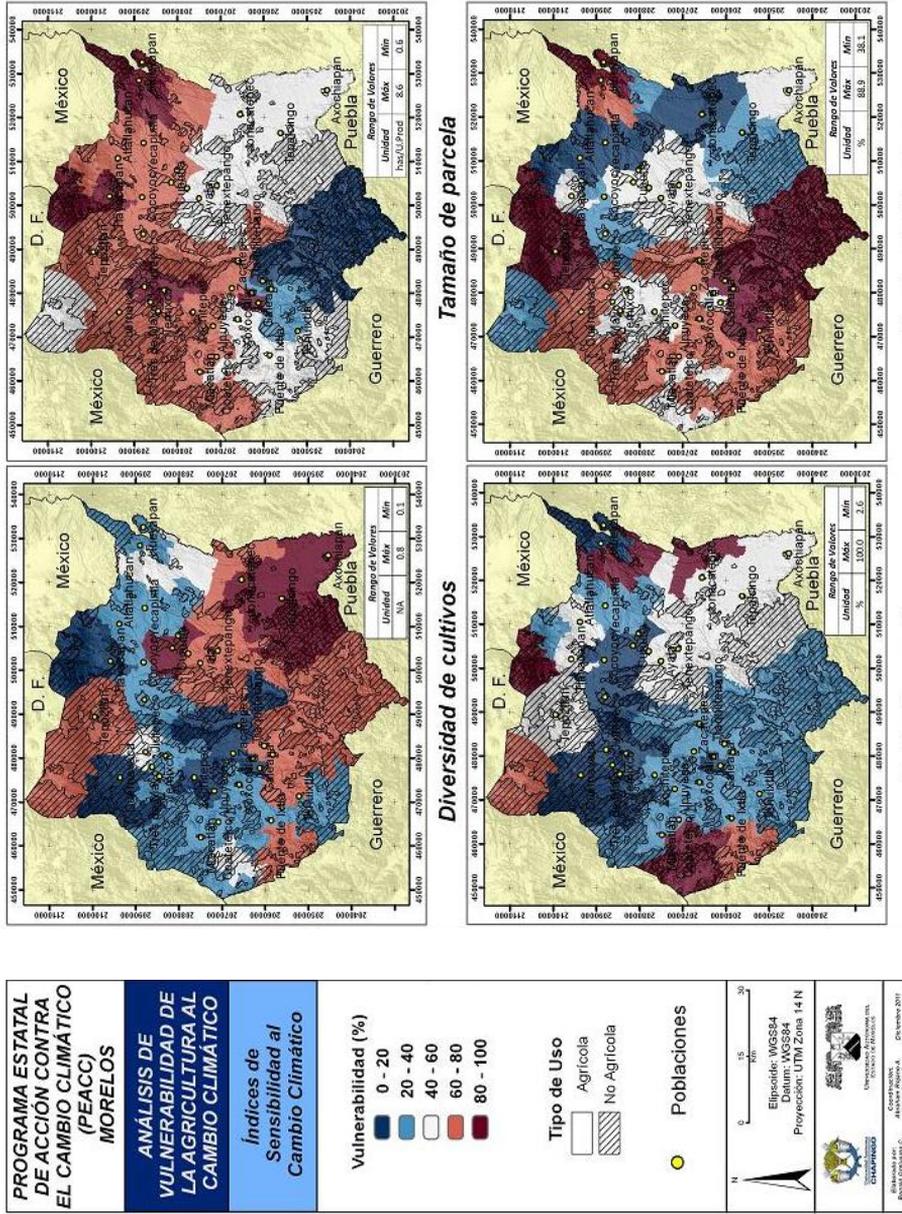


Figura 5.12. Índices de sensibilidad al cambio climático en el estado de Morelos

SENSIBILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO

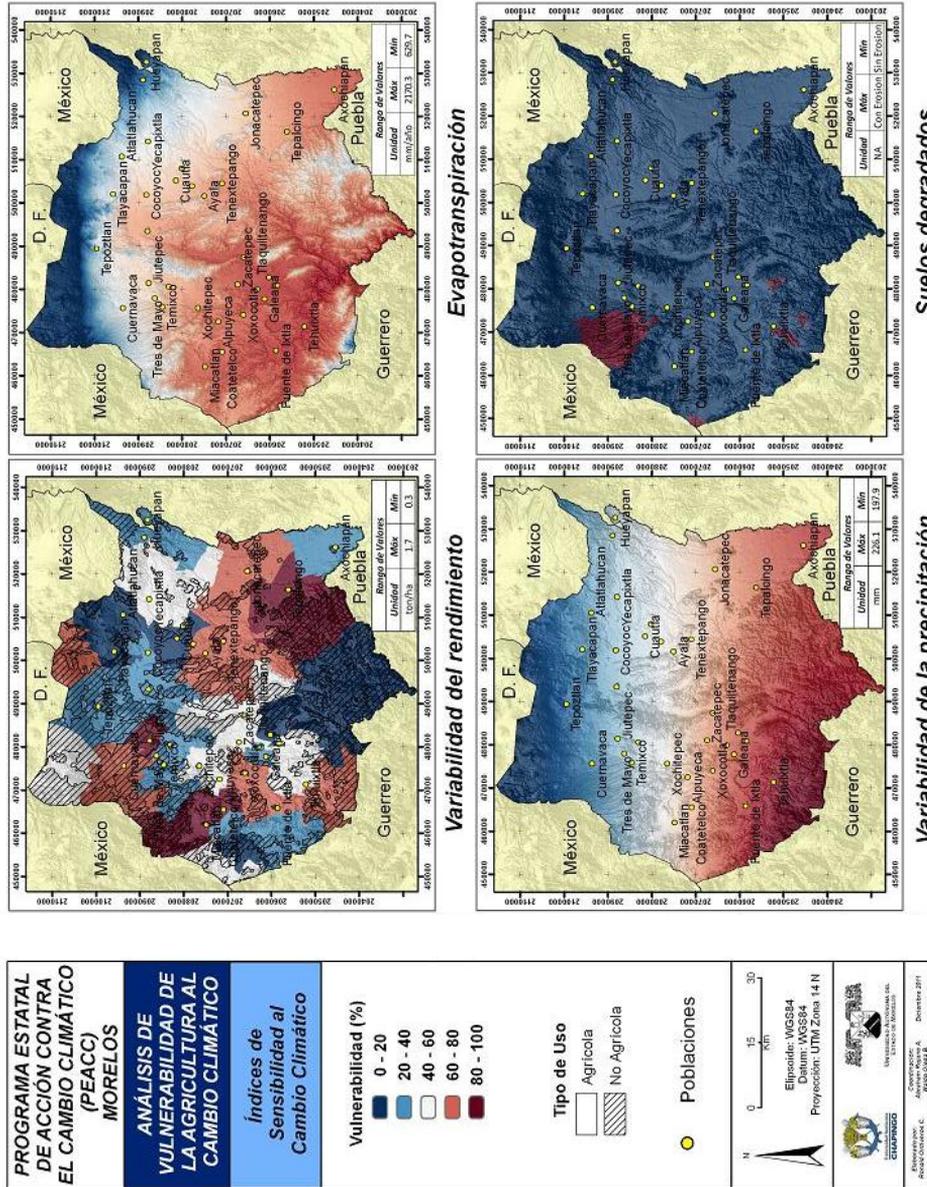


Figura 5.13. Índices de sensibilidad al cambio climático en el estado de Morelos (continuación)

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

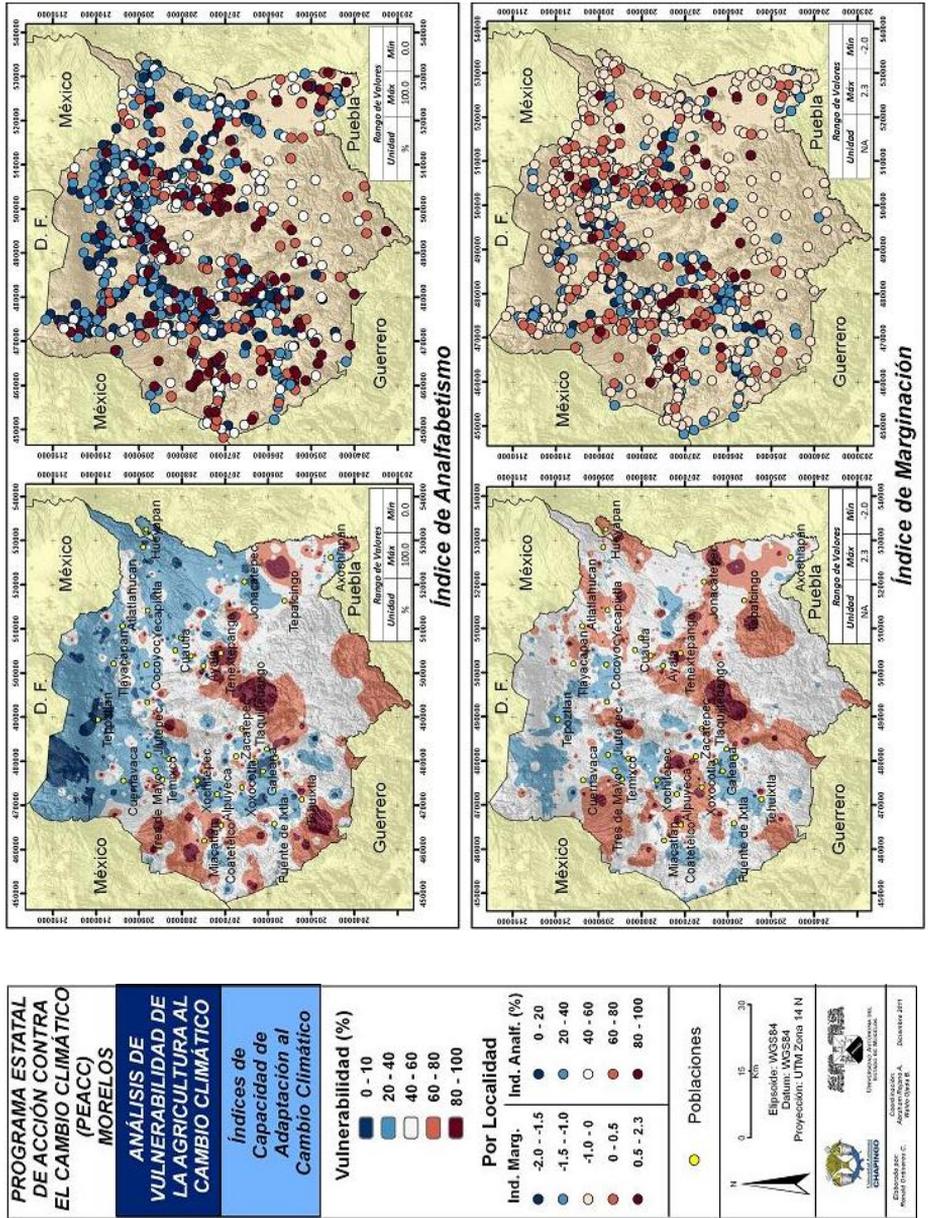


Figura 5.14. Índices de capacidad de adaptación al cambio climático en el estado de Morelos

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

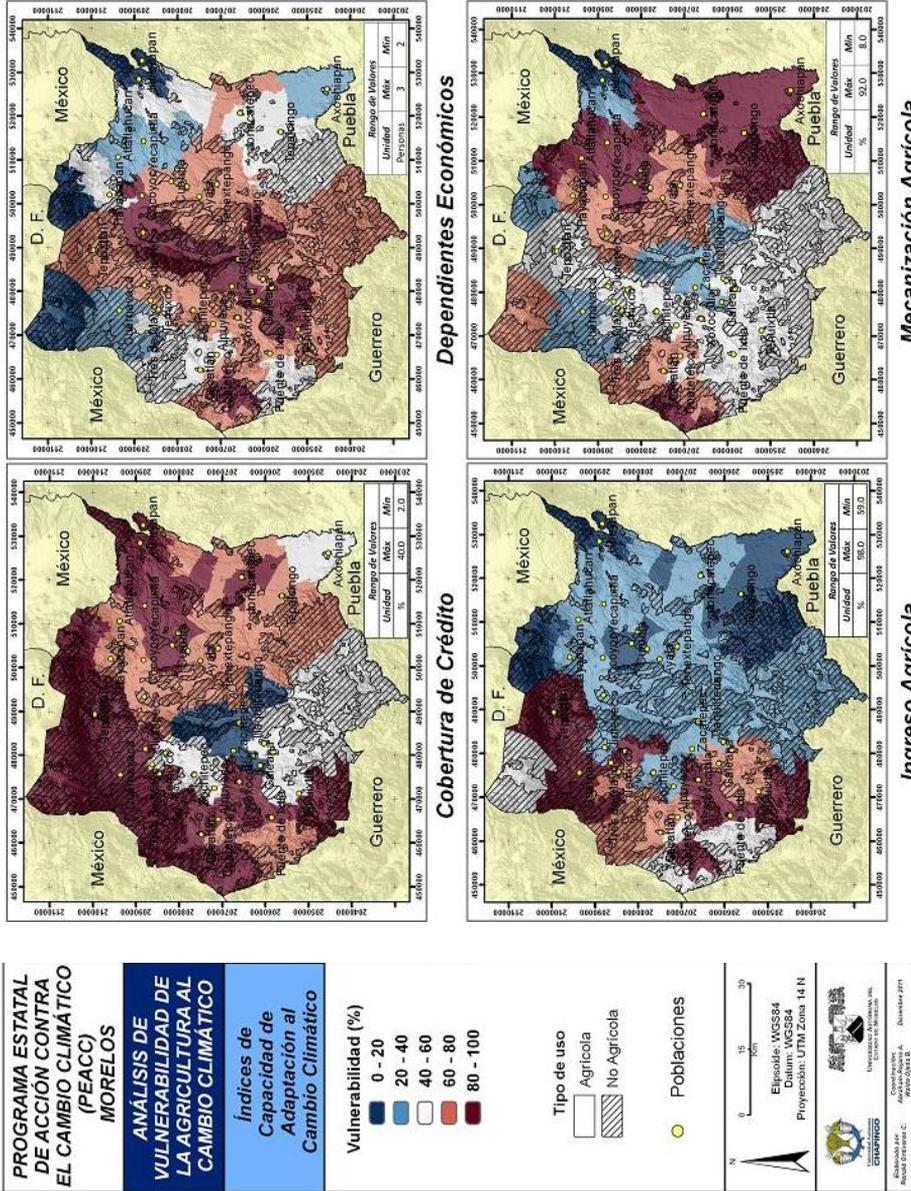


Figura 5.15. Índices de capacidad de adaptación al cambio climático en el estado de Morelos (continuación)

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

PROGRAMA ESTATAL DE ACCIÓN CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO (PEACC) MORELOS

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA AGRICULTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO

Índices de Capacidad de Adaptación al Cambio Climático

	0 - 20
	20 - 40
	40 - 60
	60 - 80
	80 - 100

● Poblaciones

N

0 15 30

Km

Elipsoidal: WGS84

Proyección: UTM Zona 14 N

GOBIERNO DEL ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD DEL ESTADO DE MORELOS

INEGI

DICIEMBRE 2011

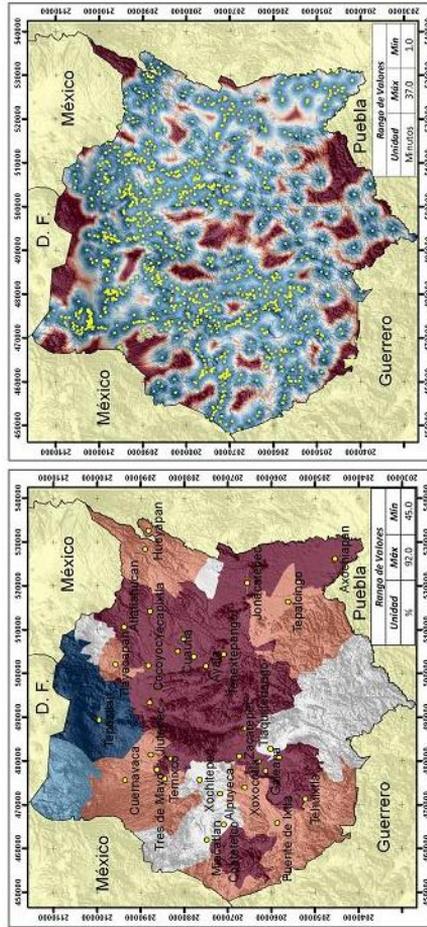


Figura 5.16. Índices de adaptación al cambio climático en el estado de Morelos (continuación)

Los dependientes económicos de actividades agrícolas se concentran en la parte central del estado, en los municipios de Yautepec, Jojutla, Tetecala, Yautepec, Tlaltizapán y Zacatepec de Hidalgo que presentan dos dependientes económicos de actividades agrícolas. La vulnerabilidad, según el porcentaje de mecanización agrícola, muestra que los municipios cercanos al límite con el estado de Puebla y la región norte que colinda con el Estado de México son los más vulnerables, ya que presentan hasta un 8% de mecanización con respecto a municipios donde se alcanza el 92%.

Según la cobertura de servicios, los municipios más vulnerables se ubican al centro del estado y en la región sur que colinda con el estado de Puebla, donde la cobertura llega hasta 45%, en comparación con los demás municipios que alcanzan coberturas de hasta 92%. Finalmente, el acceso a los centros urbanos indica que las zonas más vulnerables son aquellas más alejadas y las que tienen menos vías de comunicación, lo que dificulta desplazarse hacia los centros urbanos, y se ubican en la periferia de los límites estatales con otros estados; debe hacerse notar que este indicador sólo considera los límites del estado para el análisis y que pueden existir otras poblaciones y vías de comunicación fuera de estos límites a la que podrían desplazarse con mayor facilidad.

Vulnerabilidad global

La tabla 5.9 muestra los factores de ponderación calculados según la ecuación (5) para cada uno de los índices de vulnerabilidad considerados en cada componente.

Tabla 5.9. Factores de ponderación (P_j) para los índices de vulnerabilidad (X_j) en cada componente

Exposición		Sensibilidad		Capacidad de adaptación	
Índice (X_j)	P_j	Índice (X_j)	P_j	Índice (X_j)	P_j
Anomalía temperatura máxima	0.194	Diversidad cultivos	0.101	Índice de marginación	0.141
Anomalía temperatura mínima	0.163	Tamaño de parcela	0.138	Índice de analfabetismo	0.198
Anomalía temperatura media	0.174	Población rural	0.084	Acceso a centros urbanos	0.095
Anomalía precipitación	0.219	Uso de fertilizantes	0.105	Cobertura de servicios	0.108
Anomalía SPI	0.249	Variación en la precipitación	0.104	Numero de dependientes	0.120
		Variación en el rendimiento	0.149	Ingeniería agrícola	0.091
		Suelos degradados	0.071	Mecanización agrícola	0.122
		ET	0.248	Cobertura de créditos	0.124

Los resultados del análisis global para los componentes de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación se muestran en las figuras 5.17 a 5.19. El mapa de la figura 5.20, obtenido a partir de las figuras anteriores según la ecuación (6), refleja el resultado final del análisis de vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático, en el que se pueden apreciar claramente las áreas más vulnerables y prioritarias así como también las áreas menos afectadas.

El mapa de exposición global muestra que las zonas más vulnerables, desde el punto de vista de las variables climáticas, se ubican hacia el sureste del estado, en los límites con el estado de Puebla, mientras que las zonas menos vulnerables se localizan al noroeste en los límites del Estado de México. Para el caso de sensibilidad climática, las zonas más vulnerables están situadas en los municipios de Axochiapan, Tepalcingo, Jantetelco, Jojutla, Amacuzac, Coatlán del Río, Tetecala, Jiutepec, Mazatepec y parte de los municipios de Ocuituco, Miacatlán, Ayala, Puente de Ixtla y Tepoztlán.

El mapa de capacidad de adaptación representa la capacidad para soportar el impacto ocasionado por la exposición y la sensibilidad climática; se observa que los mayores grados de vulnerabilidad corresponden a las zonas más marginadas y con menos capacidad de respuesta que se encuentran en el municipio de Tetela del Volcán y Tlalneplanta, mientras que las regiones menos vulnerables y que responderán mejor a los cambios se ubican en el centro, en los municipios Emiliano Zapata y Zacatepec de Hidalgo.

Finalmente, el mapa de la figura 5.20 muestra el mapa global de vulnerabilidad de la agricultura al cambio climático; se puede observar que las áreas más vulnerables al cambio climático se encuentran en la región sur del estado en los límites con el estado de Puebla, sobre todo en los municipios de Axochiapan, Tepalcingo, Jojutla, Jantetelco y parte de los municipios de Jonacatepec y Puente de Ixtla, mientras que la zona menos vulnerable se ubica al norte, en los límites entre el Estado de México y el Distrito Federal y comprende los municipios de Huitzilac y parte de Tlalneplanta y Cuernavaca, es posible reconocer también los rangos intermedios de vulnerabilidad ubicados en los municipios del centro y orientados en dirección noreste-suroeste donde, se presume, mejorarán las características climáticas para la agricultura debido al incremento de la temperatura y menor disminución de la precipitación y las condiciones antrópicas analizadas en este estudio. Estas regiones son las más óptimas para considerar una mejor adaptación de los cultivos a la agricultura desde todos los puntos de vista y los indicadores que se analizaron. Un análisis comparativo de la superficie desglosada por el grado de vulnerabilidad en cada uno de los componentes y de la vulnerabilidad global se muestra en la tabla 5.10.

Tabla 5.10. Distribución porcentual de la superficie del estado de Morelos según el grado de vulnerabilidad de cada componente (E,S,CA) y vulnerabilidad global (V)

Grado	Rango (%)	% de Superficie			
		E	S	CA	V
No vulnerable	0-20	18.44	2.13	3.54	5.94
Ligeramente vulnerable	20-40	17.35	6.56	28.40	15.39
Vulnerable	40-60	16.93	16.91	53.62	22.11
Muy vulnerable	60-80	22.44	36.41	13.69	37.07
Altamente vulnerable	80-100	24.84	37.99	0.75	19.50

Se observa una distribución desigual de la superficie para los diferentes componentes de la vulnerabilidad, así el componente de exposición muestra que los grados de vulnerabilidad están distribuidos entre el 18.44% y el 24.84%, lo cual demuestra que el impacto del cambio climático, desde las variables climáticas, será gradual pero uniforme para todo el estado.

El componente de sensibilidad tiene una predominancia de los grados altamente vulnerable, muy vulnerable y vulnerable, con 37.99%, 36.41% y 16.91%, respectivamente; lo cual muestra que, según los indicadores analizados, gran parte del estado será muy sensible al cambio climático. Finalmente, respecto a la capacidad de adaptación, sobresalen los grados vulnerable (53.62%) y ligeramente vulnerable (28.4%) los cuales sugiere que gran parte de estado tendrá una buena capacidad de adaptarse al impacto ocasionado por la exposición y sensibilidad climática; los indicadores analizados permitirán disminuir el impacto del cambio climático y adaptarse mejor a las nuevas condiciones

El análisis de vulnerabilidad global refleja que cerca del 78.68% de la superficie total del estado presenta un grado desde vulnerable hasta altamente vulnerable; de esta proporción predomina el grado muy vulnerable con 37.07%, seguido por vulnerable y altamente vulnerable con 22.11% y 19.5% respectivamente. La priorización de estrategias y acciones para disminuir los efectos del cambio climático deben ser encaminadas a estas regiones ya que representarán las más afectadas y con menor grado de adaptación.

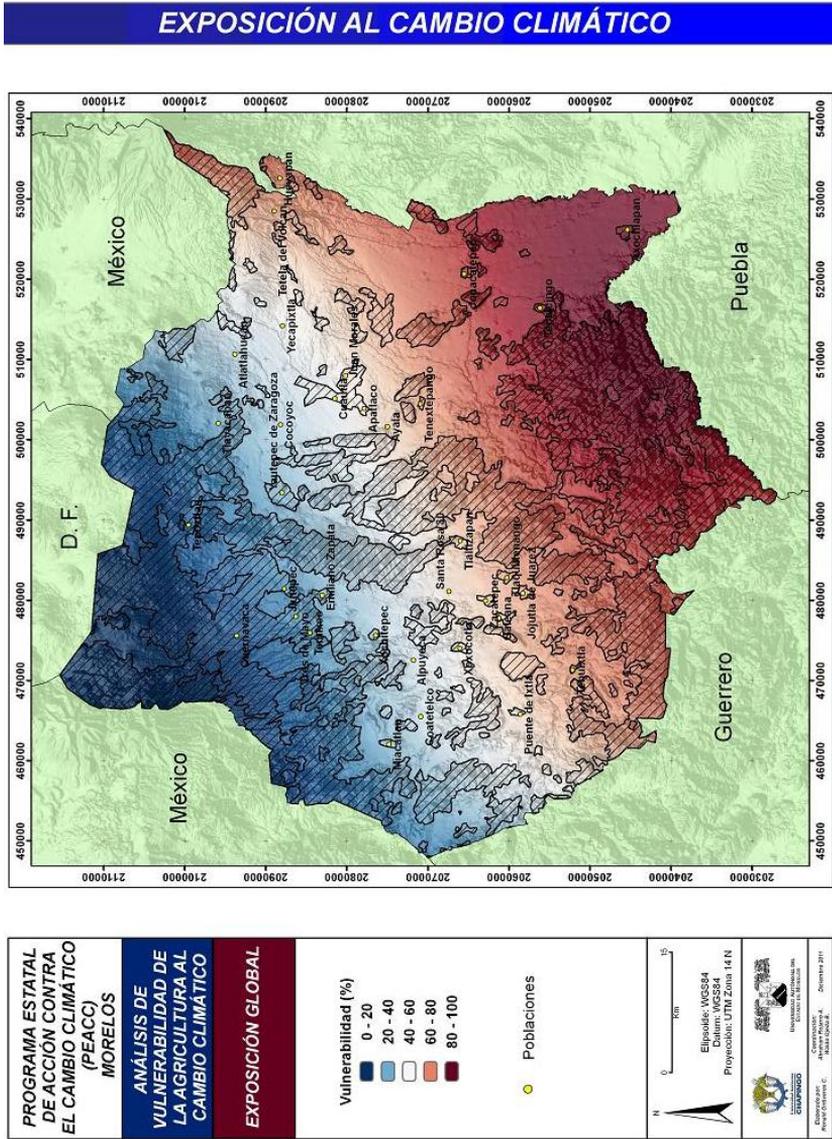


Figura 5.17. Exposición climática global para el estado de Morelos

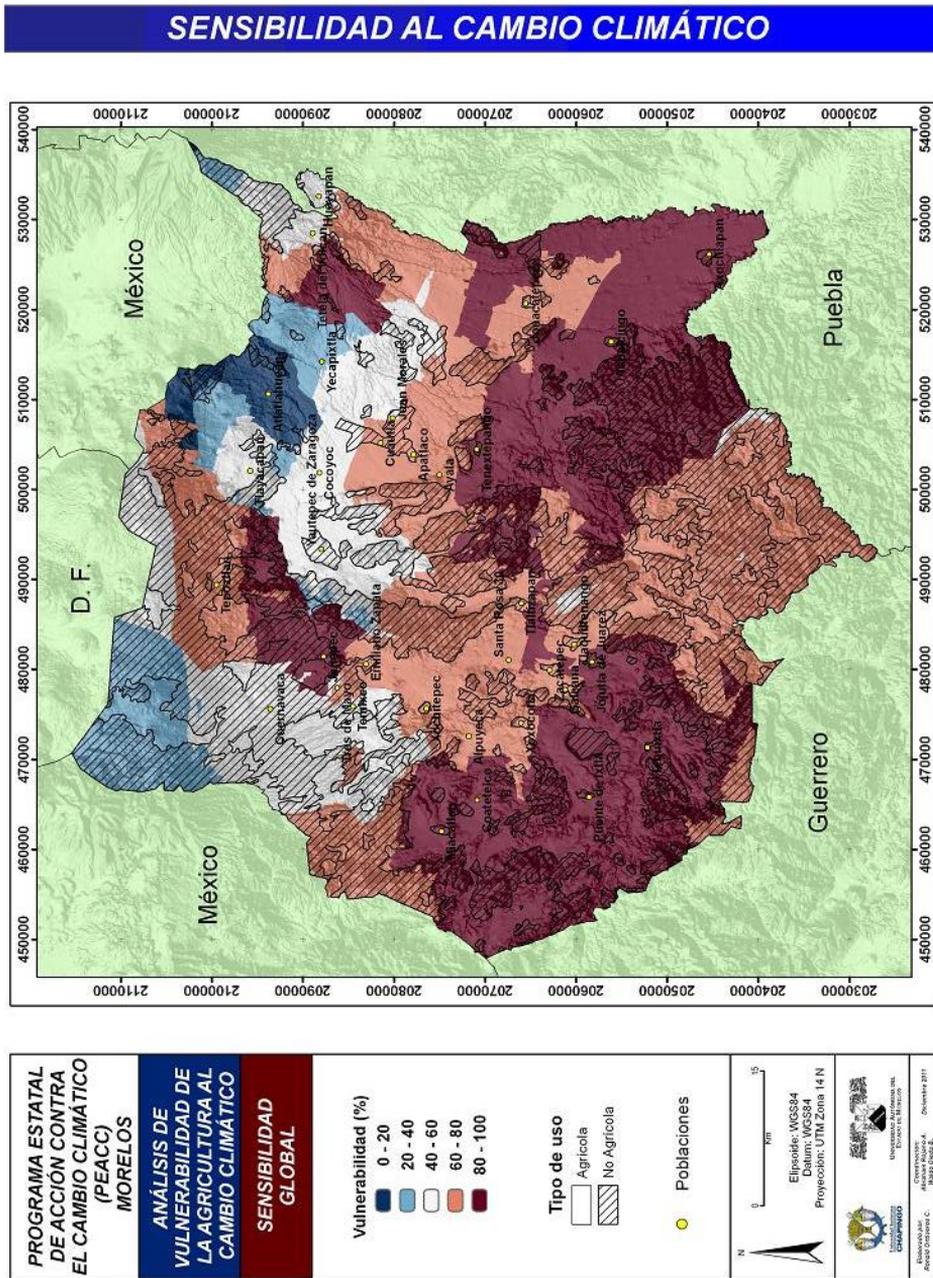


Figura 5.18. Sensibilidad climática global para el estado de Morelos

CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO

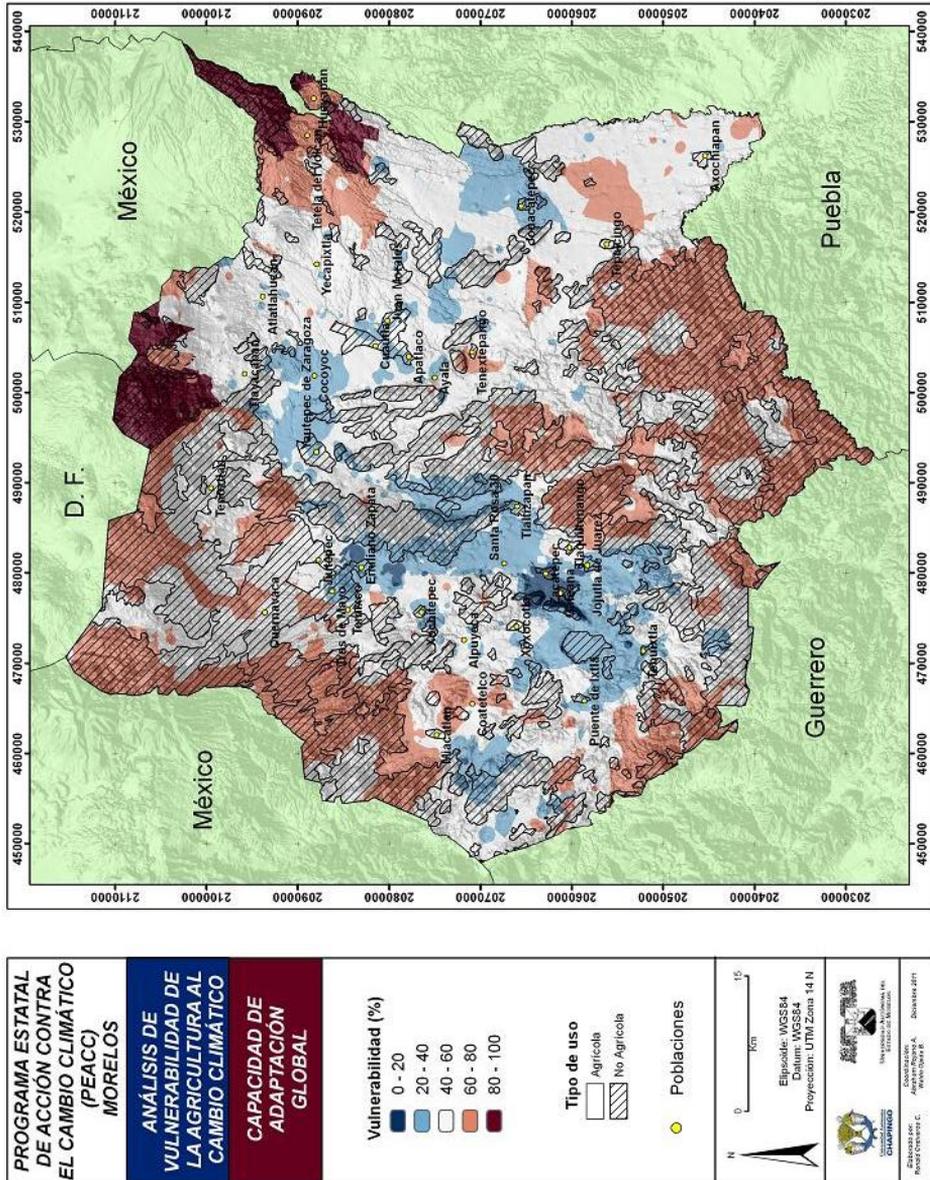


Figura 5.19. Capacidad de adaptación global para el estado de Morelos

VULNERABILIDAD GLOBAL DE LA AGRICULTURA AL C. C.

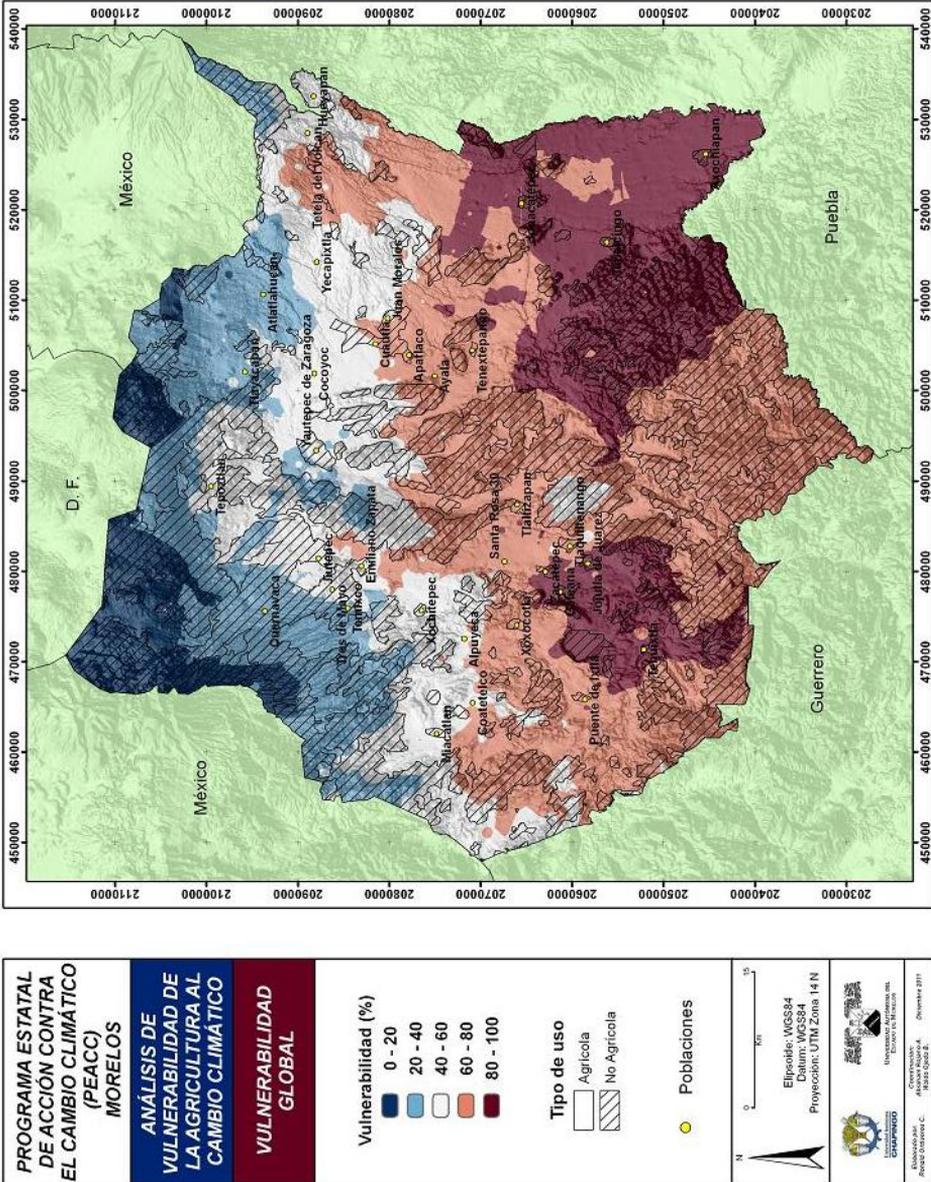


Figura 5.20. Vulnerabilidad global de la agricultura para el estado de Morelos

Potencial productivo del maíz de temporal ante el cambio climático en Morelos

La zonificación del cultivo de maíz de acuerdo a los requerimientos agroclimáticos mostrados en la tabla 5.7, indican que la totalidad del estado de Morelos es apta para el cultivo de maíz según los requerimientos de temperatura y precipitación; sin embargo, las principales restricciones se deben a la pendiente y al período de crecimiento, de manera que sólo existe una fracción de la superficie total que es apta (A) para el cultivo del maíz.

La figura 5.21 muestra el mapa potencial productivo de maíz para los períodos actual (1961-1990) (elaborado a partir de los datos de climatología histórica) y para el escenario A2 (2071-2098), el área potencialmente apta se muestra resumida en la tabla 5.11.

Tabla 5.11. Superficie apta para el cultivo de maíz en el estado de Morelos según el período actual (1950-2000) y el escenario A2 (2071-2098)

Periodo	Actual (1950-2000)	Escenario A2 (2071-2098)
	Superficie (has)	
Zona Apta	84775.5	24088.3

La reducción de la superficie apta del estado para el cultivo de maíz es de un 73% del total del que se dispone actualmente, además se observa que la zona apta se desplaza hacia el norte, más cerca de la Sierra del Chichinutzin.

Conclusiones

El trabajo extensivo para estimar la vulnerabilidad de la agricultura de temporal en el estado de Morelos permite generar los siguientes puntos de vista en el campo de la agricultura de temporal:

1. Las bases de datos actuales, los esquemas de interpolación junto con las capacidades computacionales muestran escenarios temporales y espaciales que permitan entender y aplicar acciones de adaptación y mitigación.
2. La actualización de información local y climática y la predicción por medio de modelos de circulación global permiten complementar los mapas adicionales de anomalías, exposición, sensibilidad y adaptación climática.
3. La combinación con igual ponderación de la exposición, vulnerabilidad y adaptación, generan los escenarios finales presentados.
4. El uso de mapas con diferentes escalas requiere interpolaciones intermedias, empezando con las escalas más finas.

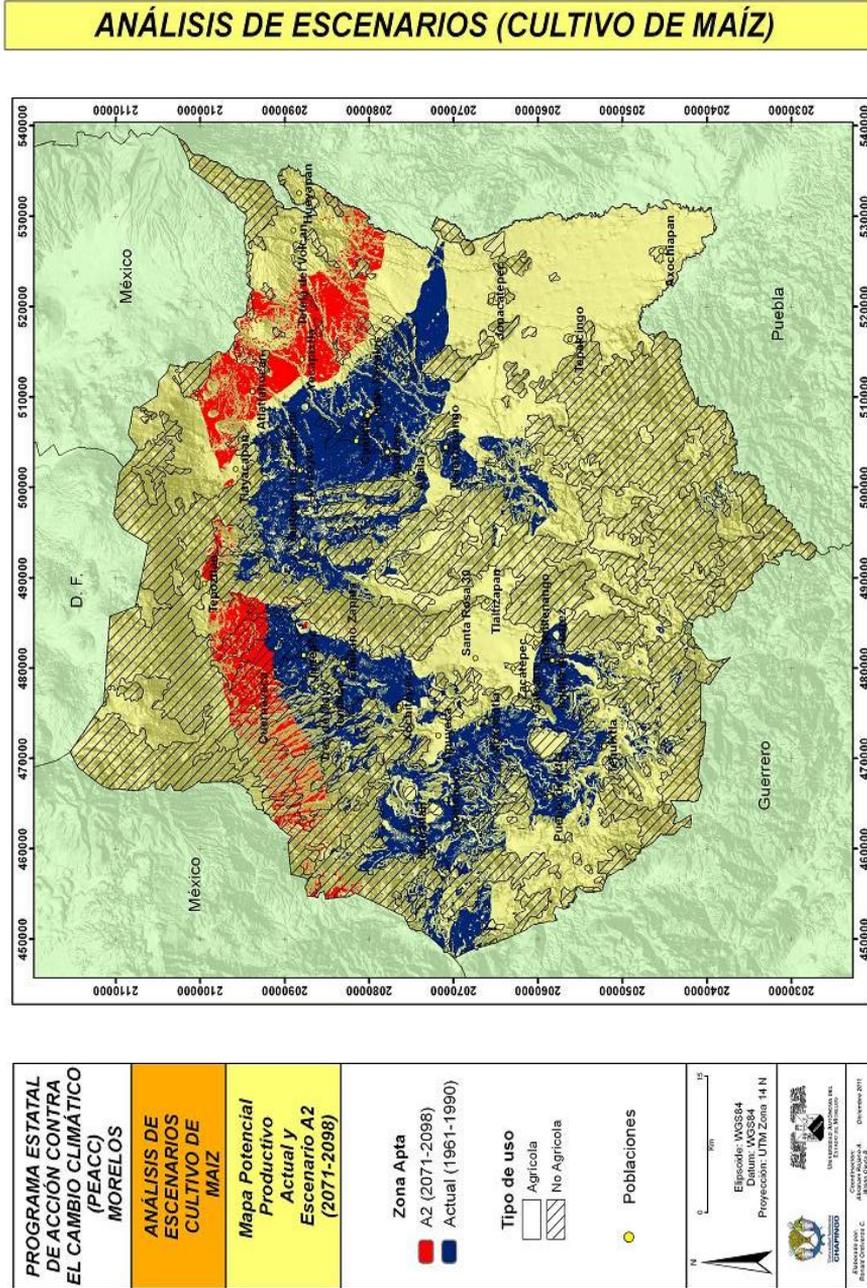


Figura 5.21. Mapa potencial productivo para el cultivo de maíz según los periodos actual (1961-1990) y el escenario A2 (2071-2098)

5. La presentación de vulnerabilidad en forma espacial puede servir de base para construir mapas de riesgo.
6. El estudio de la vulnerabilidad en el estado de Morelos muestra la distribución actual y futura de uno de los cultivos más representativos del estado, como lo es el maíz.

Finalmente, también fue posible el desarrollo de este trabajo con la información adicional de estudios realizados con anterioridad. El análisis de la vulnerabilidad se hace para todo el estado de acuerdo a los efectos de cambio climático en la agricultura, la infraestructura y el comportamiento social de la entidad.

En algunos modelos se predice un desplazamiento normal hacia el norte de la agricultura, y esto coincide con los resultados de este trabajo. Asimismo, la investigación adicional de tipo regional o local es necesaria para determinar los cambios a nivel más detallado que tome en cuenta la naturaleza dinámica de los procesos. Con base en las expectativas de la variabilidad del clima éste es analizado y ajustado en presentaciones visuales como un incentivo para que los tomadores de decisiones adopten las estrategias más adecuadas de gestión y prácticas agrícolas en el manejo de tierras.

Referencias bibliográficas

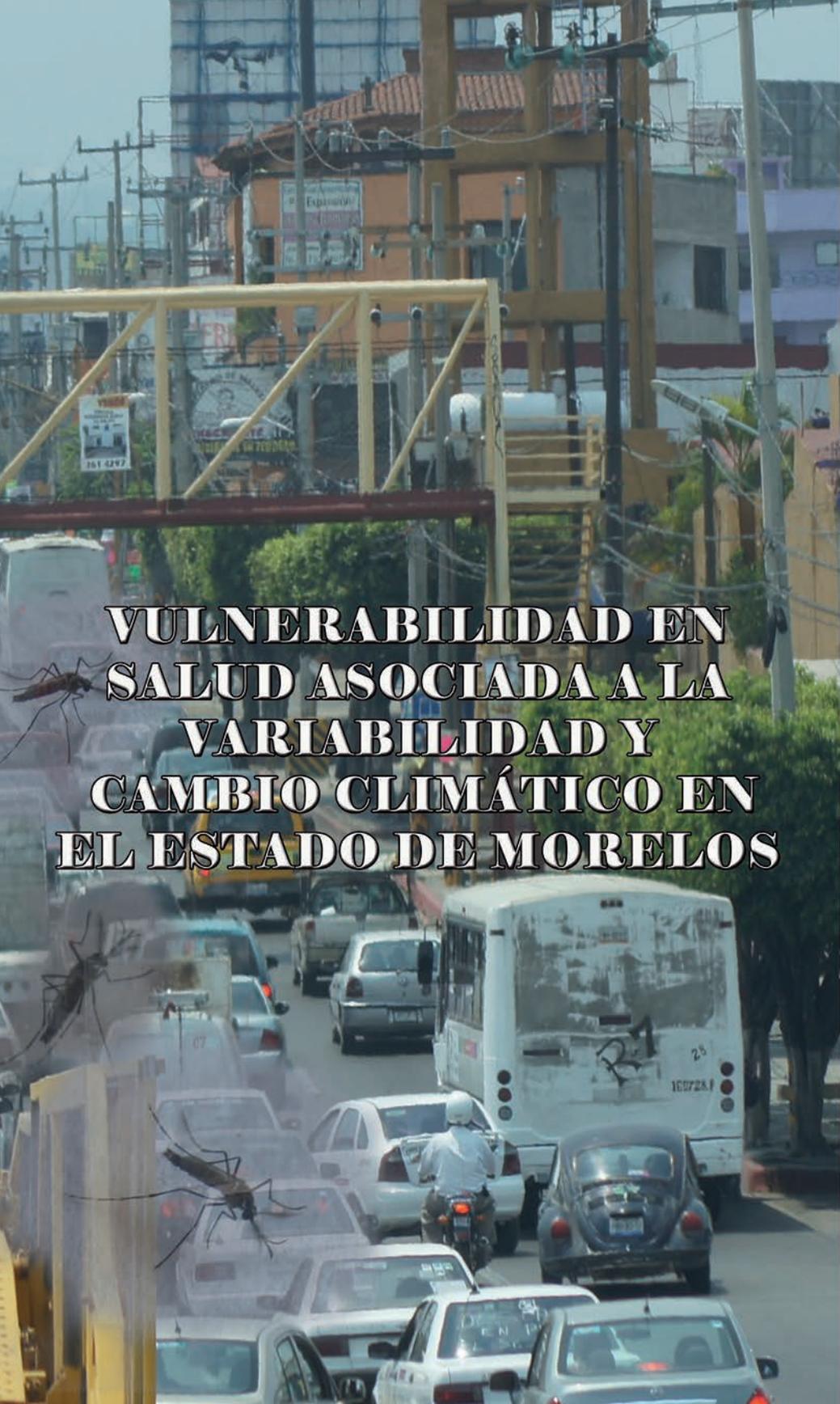
- CONAPO. (2005). Índices de marginación 2005 por municipio. Consejo Nacional de Población. Base de datos. México, D.F.
- Darwin R., Tsigas M., Lewandrowski J. y Ranases A. (1995). World Agriculture and Climate Change: Economic Adaptation. Report No. AER-709. Economic Research Service. Washington DC, EEUU.
- Ellis R. H., Hadley P., Roberts E. H. y Summerfield R. J. (1990). Quantitative relations between temperature and crop development and growth. In: Climatic Change and Plant Genetics Resources. Jackson, M. T., B.V. Ford-Lloyd, y M. L. Parry (eds). Belhaven Press. Londres, Inglaterra. 85-115 pp.
- Fischer G., Tubiello F.N., Van Velthuizen H. y Wiberg D. A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990-2080. *Technol. Forecasting Soc. Change*, 74. 1083-1107 pp.
- Flores, M., R. Araujo & E. Betancourt. 2000. *Vulnerabilidad de las zonas potencialmente aptas para Maíz de temporal en México ante el cambio climático*. Págs. 103-118. En: Gay C. [compilador]. 2000. México: Una visión hacia el siglo XXI. El cambio climático en México. Resultados de los estudios de la vulnerabilidad del país. INE-UNAM-US Study Program. 220 pp.
- Gbetibouo G. A. y Ringler. (2009). Mapping South African Farming Sector Vulnerability to Climate Change and Variability: A Subnational Assessment. IFPRI Discussion Paper 00885. International Food Policy Research Institute

- Environment and Production Technology Division. Washington, D.C., EEUU. 30 pp.
- Hijmans R., Cameron S., Parra J. L., Jones P. G., y Jarvis A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. Wiley Interscience. *Intl J. of Clim.* 25(2005): 1956-1978 pp.
- IMTA, Mexicano de Tecnología del Agua. 2008. Estaciones climatológicas (ERIC). Catálogo de metadatos geográficos. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- INEGI. (2005). Cartografía Uso de Suelo y Vegetación Escala 1:250,000 Serie III. Estados Unidos Mexicanos. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2009). Censo Agropecuario 2007. VIII Censo agrícola, Ganadero y Forestal. Estados Unidos Mexicanos. Aguascalientes, México.
- INEGI. (2011). Continúo de elevaciones Mexicano CEM 2.0. Disponible a través de internet: www.inegi.org.mx
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Impacts, adaptation and vulnerability climate change 2001. Third assessment Report of the IPCC. University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del IPCC. Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (eds). Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Ginebra, Suiza. 104 pp.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2010). Informe Especial del Grupo de trabajo III publicado por el Grupo Intergubernamental sobre Cambio Climático. 22 pp.
- Leemans R. y Solomon A. M. (1993). Modelling the potential in yield and distribution of the earth's crops under a warmed climate. *Clim. Res.* 3: 79-96 pp.
- Magurran. (1988). Ecological diversity and its measurement. Croom Helm, Londres, 179 p.
- Mendelsohn R., Nordhaus W. y Shaw D. (1994). The impact of climate on agriculture: a Ricardian approach. *American Economic Review* 84: 753-771 pp.
- Montero M. J. y Pérez J. L. (2008). Regionalización de proyecciones climáticas en México de precipitación y temperatura en superficie usando el método REA para el siglo XXI. In: P. Martínez y A. Aguilar (eds). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Vol II. Eds A. Aguilar y P. Martínez. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 73-83 pp.
- Monterroso R. A. I., Conde A. C., Rosales D. G, Gómez D. J. D. y Gay G. C. (2011). Assessing current and potential rainfed maize suitability under climate change scenarios in México. *Atmósfera.* 24(1), 53-67 pp.
- Ojeda-Bustamante W., Iñiguez-Covarrubias M., González-Camacho J. M. (2010). Vulnerabilidad de la agricultura de riego de México ante el cambio climático. Capítulo 5 del libro "Atlas de vulnerabilidad hídrica en México

- ante el cambio climático". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 115-142 pp.
- Ortiz C. A. (1987). Elementos de agrometeorología cuantitativa con aplicaciones para la República Mexicana. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. México. 327 pp.
- Reyes, P. 1990. El maíz y su cultivo. Ed. Agt. Editor, S.A. México. 460 pp.
- Rosenzweig C. y Daniel M. M. (1989). Agriculture. In The potential effects of global change on the United States. Chapter 6. Smith J. B y D. A Tirpak. (eds). EPA (Environmental Protection Agency). EPA-230-05-89-050. Washington DC, EEUU. 89-117 pp.
- Rosenzweig C. y Parry M. L. (1994). Potential impacts of climate change on world food supply. Nature 367: 133-138 pp.
- SIAP. 2011.
http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=10&Itemid=15.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2009). Información estadística agrícola con desagregación geográfica del acuerdo en nivel Distrito de Desarrollo Rural (DDR) (1999-2008) y nivel municipal (2003-2008) Disponible en línea en el portal del SIAP: <http://www.siap.gob.mx/>.
- Trabucco A. y Zomer R. J. (2009). Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapotranspiration (Global-PET): Geospatial Database CGIAR. Consortium for Spatial Disponible en línea <http://www.csi.cgiar.org>.

6

CAPÍTULO



**VULNERABILIDAD EN
SALUD ASOCIADA A LA
VARIABILIDAD Y
CAMBIO CLIMÁTICO EN
EL ESTADO DE MORELOS**

CAPÍTULO 6

VULNERABILIDAD EN SALUD ASOCIADA A LA VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ESTADO DE MORELOS

Magali Hurtado Díaz^{15*}
Luis Antonio Arias Medellín*
Horacio Riojas Rodríguez*

Introducción

El calentamiento global es un fenómeno que con el tiempo ha tenido mayores evidencias científicas. Diversos estudios han demostrado que el aumento de gases de efecto invernadero (principalmente dióxido de carbono, aunque también otros gases como el metano, óxido nítrico y clorofluorcarbonos), han causado un aumento en la temperatura media global del planeta en 0.6°C durante los últimos 100 años. Se han desarrollado modelos climáticos que prevén que, si el aumento de estos gases continúa de esta manera, en los siguientes 100 años podría elevarse la temperatura del planeta entre 1.8 y 7.1°C. Esto produciría variaciones en los fenómenos meteorológicos (por ejemplo, cambios en la temperatura ambiente y en los patrones de precipitación) afectando a las poblaciones humanas (Justus y Fletcher, 2006).

Los cambios en los patrones climáticos pueden alterar la incidencia de algunas enfermedades humanas de manera directa e indirecta. Los efectos directos son aquellos que, mediante cambios en el clima, tienen un impacto sobre el organismo humano; un ejemplo de ello es la mayor morbilidad por golpe de calor como resultado de cambios en la frecuencia e intensidad de olas de calor. Por otro lado, los efectos indirectos afectan los sistemas biológicos y biogeoquímicos, causando alteraciones en la distribución espacial y temporal de enfermedades o favoreciendo su aparición (Martens, 1998; Ebi *et al.*, 2006; Ebi, 2008); por ejemplo, se ha observado una mayor incidencia de dengue debido a la alza en la temperatura ambiente y en la precipitación en Costa Rica y Nicaragua (Balmaseda *et al.*, 2010; Mena *et al.*, 2011). En ambos casos, la incidencia de las enfermedades podría aumentar como resultado de un cambio en el clima, por lo que es de interés saber la relación que existe entre ambos factores.

Existen varios estudios en los que se han encontrado relaciones positivas entre cambios en el clima e incidencias de ciertas enfermedades. Algunos ejemplos de ellos son una mayor ocurrencia de casos de infecciones estomacales provocadas por bacterias debido a una alza en la temperatura ambiente (Fleury *et al.*, 2006), un

^{15*}Investigadores del Instituto Nacional de Salud Pública

aumento en el número de registros de malaria y cólera en la presencia de los fenómenos meteorológicos como “El Niño” y “La Niña” (Barrera *et al.*, 1999; Kovats *et al.*, 2003), el incremento en la mortalidad debido a la olas de calor (Ballester, 2008), entre otros. Para el caso de México se han realizado muy pocos estudios de este tipo, pero Riojas *et al.* (2006) encontraron que el aumento en la temperatura ambiente genera un aumento en la mortalidad por golpe de calor y una mayor incidencia en casos de dengue, paludismo y enfermedades diarreicas. Además, también encontraron una mayor mortalidad por enfermedades respiratorias, relacionada con el aumento en la temperatura ambiente y la concentración de ozono (Riojas *et al.*, 2006). Debido a la poca información que se tiene sobre este tema en México, es de suma importancia realizar estudios para tener una mayor comprensión de la relación entre los cambios climáticos y sus efectos en la salud humana, en la población mexicana.

Antecedentes

Para evaluar la relación clima-salud, la Organización Mundial para la Salud (OMS) ha utilizado estudios epidemiológicos que han analizado observaciones cronológicas de temperatura, precipitación y casos de enfermedad/mortalidad en poblaciones delimitadas geográficamente (ciudades, regiones, países, etcétera) con el fin de estimar la proporción de muerte o enfermedad atribuible a los cambios en el clima (OMS, 2008). Los eventos considerados por la OMS para evaluar el estado de salud de una población (carga global de la enfermedad) atribuidos a las variaciones (a corto plazo) a exposiciones meteorológicas incluyen impactos directos del calor y del frío sobre la salud, efectos en la salud asociados a la disposición de alimentos, aquellos causados por eventos hidrometeorológicos, enfermedades relacionadas con la contaminación atmosférica, enfermedades transmitidas por vectores, agua y alimentos y zoonosis.

En el Cuarto Informe de evaluación del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, 2007), el grupo de trabajo de “impactos, adaptación y vulnerabilidad” precisó que estos eventos se pueden dar de manera directa o a través de múltiples vías y que su asociación con las variables climáticas pueden estar modificadas por aspectos ambientales, sociales y propios de los sistemas de salud (Figura 6.1).

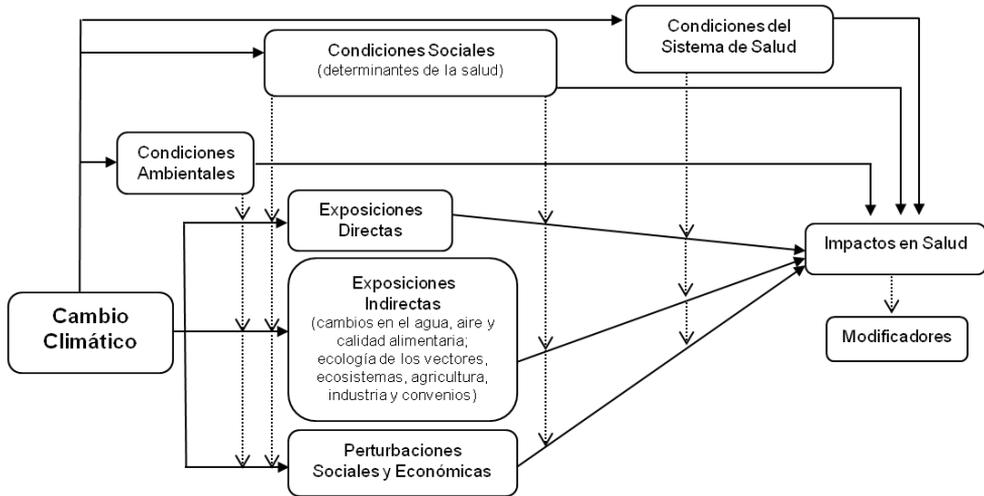


Figura 6.1. Vías por las que el cambio climático afecta la salud humana. **Fuente:** IPCC, 2007.

Eventos de morbi-mortalidad relacionados con la temperatura

El impacto directo más evidente de los cambios en el clima sobre la morbi-mortalidad está asociado a los extremos térmicos. La disminución de la temperatura ambiente se encuentra relacionada con una mayor morbi-mortalidad de enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Kilbourne, 1992; Eldwood *et al.*, 1993; Kunst *et al.*, 1993). Para el caso de las enfermedades respiratorias, el frío aumenta la incidencia de enfermedades respiratorias (por ejemplo, neumonía y gripe) y causa muertes por agravamiento de enfermos por obstrucción pulmonar crónica (Eldwood *et al.*, 1993), mientras que la mortalidad por enfermedades cardiovasculares aumenta debido a una mayor presión arterial y agregación plasmática en la sangre (Kilbourne, 1992; Kunst *et al.*, 1993). Por otro lado, el alza de las temperaturas y las olas de calor provocan incrementos en la mortalidad, principalmente por causas cardiovasculares, cerebrovasculares, respiratorias, y en algunos casos por golpe de calor (Martínez *et al.*, 1989; Ramlow y Kuller, 1990; Kattsouyanni *et al.*, 1993). Existen varios estudios que documentan la relación entre enfermedades como golpe de calor, infecciones respiratorias agudas y tuberculosis con cambios de temperatura (Kilbourne, 1992; Kunst *et al.*, 1993; Douglas *et al.*, 2005; Atun *et al.*, 2005; Nagayama y Ohmori, 2006; Mastrangelo *et al.*, 2007). Sin embargo, otro problema de salud es el envenenamiento por picadura de alacrán, el cual ha sido poco estudiado, pero se tiene evidencia que su morbilidad varía con la temperatura (Chowell *et al.*, 2005, 2006).

Golpe de calor

Al incremento significativo de la temperatura durante un período de tiempo prolongado, se le conoce como ola de calor (Robinson, 2001). A consecuencia de las altas temperaturas, y en ocasiones con una humedad ambiental alta, se puede padecer el golpe de calor, el cual se produce cuando el calor corporal no se disipa y la temperatura del cuerpo aumenta por arriba de los 41°C (Petersdorf, 1994). El golpe de calor ocurre con mayor frecuencia en las estaciones calurosas y son más susceptibles a padecerlo la gente de edad avanzada, personas que realizan actividades físicas en ambientes calurosos, pacientes con trastornos neurológicos discapacitantes (por ejemplo, esclerosis múltiple, lateral amiotrófica, entre otros), pacientes con fibrosis quística, personas alcohólicas y con trastornos mentales (Petersdorf, 1994; Batscha, 1997; Dixit *et al.*, 1997; Hsu *et al.*, 1997; Chain-Castro y Haro-García, 1997). Un ejemplo del daño que puede provocar una ola de calor ocurrió en Europa en 2003, donde se registraron 80,000 excesos de muertes comparadas con el período 1998-2002 (Robine *et al.*, 2007). En México, se ha encontrado una relación positiva entre el aumento de la temperatura y la mortalidad por golpe de calor en Baja California y Sonora (Riojas *et al.*, 2006).

Infecciones respiratorias agudas (IRA)

Los cambios de temperatura pueden aumentar la morbi-mortalidad de enfermedades respiratorias. Por un lado, el frío aumenta la incidencia de enfermedades respiratorias al crearse condiciones que facilitan la transmisión de virus (por ejemplo, aglomeramiento en lugares cerrados, poca ventilación de espacios, entre otros) (Kilbourne, 1992; Kunst *et al.*, 1993). Por otro lado, al presentarse olas de calor repentinas, el cuerpo es expuesto a cambios de temperatura sin una previa aclimatación, lo que desencadena el padecimiento de enfermedades respiratorias (Kilbourne, 1992; Kunst *et al.*, 1993; Mastrangelo *et al.*, 2007). Para el caso de la República Mexicana y el estado de Morelos, la morbilidad por enfermedades respiratorias agudas ocupa el primer lugar con 24,649 y 27,211 casos por 100,000 habitantes, respectivamente (SSA, 2010; INEGI, 2010).

Tuberculosis pulmonar (TB)

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) (1994), en 1990 se registraron 1,722 millones de casos de TB, ocho millones de casos nuevos y entre 2.6 y 2.9 millones de defunciones en el mundo. Además, en la década de los 90's, se estimó un incremento en el número de casos nuevos y en las defunciones por dicha enfermedad (OMS, 1994). En México, la TB sigue siendo un problema de salud, a pesar de que ha disminuido la tasa por 100,000 habitantes de 15.30 en 2002 a 13.89 en 2010 (SSA, 2010). En Morelos, en 2010, se registraron 7.42 casos por 100,000 habitantes (SUIVE).

Diversos estudios muestran que la TB presenta variaciones estacionales. En algunos casos, la mayor incidencia en TB se registra en los meses más fríos, aunque también se ha visto que ocurre lo contrario (Douglas *et al.*, 2005; Atun *et al.*, 2005; Nagayama y Ohmori, 2006).

Picadura de alacrán

El envenenamiento por picadura de alacrán es una causa importante de hospitalización en varios países (Bawaskar y Bawaskar, 1989; Santos *et al.*, 1993; Abroug *et al.*, 1999; Al-Asmari y Al-Saif, 2004). México no es la excepción, y aunque el número de casos ha ido disminuyendo, su morbilidad sigue siendo alta en algunos estados (Celis *et al.*, 2007). Tal es el caso de Morelos, el cual es uno de los tres estados con más casos de envenenamiento por picadura de alacrán en México, mientras que también se encuentra dentro de las primeras cinco causas de morbilidad dentro del estado (SSA, 2002-2010).

El comportamiento de los alacranes posee variaciones anuales, observándose una mayor densidad superficial en meses con temperaturas entre los 15° y 30°C (Polis, 1980). Este comportamiento coincide con un mayor registro de casos de picaduras de alacrán durante los meses más cálidos (Gordillo *et al.*, 2000; Chowell *et al.*, 2005; Chowell *et al.*, 2006). Sin embargo, la relación entre variables climáticas e incidencia de picaduras de alacrán ha sido muy poco estudiada. El único estudio se ha realizado en Colima, México, en donde se observó una relación entre la temperatura mínima y la precipitación con la morbilidad por picadura de alacrán (Chowell *et al.*, 2005).

Efectos sobre la salud relacionados con fenómenos hidrometeorológicos

Los desastres naturales poseen un gran potencial para causar daños a la población humana, produciendo un exceso mayor a lo habitual en la mortalidad y morbilidad de una población, modificando el patrón de enfermedades transmisibles, afectando el sistema de servicios sanitarios y teniendo efectos sobre la salud mental y el comportamiento humano (Lechat, 1979, 1990; Kovats *et al.*, 1999; Vellings y Van Verseveld, 2000). En los últimos años el número de desastres naturales en el mundo ha ido en aumento: en 1988 ocurrieron 201 desastres naturales, cantidad que se duplicó para el 2007, registrándose 414 desastres naturales que mataron a 16,847 personas y afectaron a más de 211 millones (Scheuren *et al.*, 2008). Se piensa que este aumento ha sido causado por el calentamiento global, y se prevé que el número de desastres naturales y su intensidad aumenten en un futuro (Vellings y Van Verseveld, 2000).

Los desastres hidrológicos (por ejemplo, las inundaciones) y meteorológicos (como los ciclones tropicales) son los que ocurren con mayor frecuencia en el mundo, con

un 55% y un 25% del total de los desastres naturales, respectivamente (Scheuren *et al.*, 2008). Además, su número ha ido en aumento, ya que en el 2007 se observó un aumento del 8.4% en los desastres hidrológicos y del 28% en los desastres meteorológicos, comparados con el período 2000-2006 (Scheuren *et al.*, 2008). México ocupa el octavo lugar en cuanto a desastres naturales reportados en 2007, siendo aproximadamente un 60% de origen hidrológico y el resto meteorológico, los cuales en conjunto causaron la muerte de 1,858,058 personas, colocándolo en sexto lugar en mortalidad por desastres naturales a nivel mundial (Scheuren *et al.*, 2008). Por lo tanto, si el número e intensidad de estos desastres aumentara, México podría verse afectado.

Los desastres hidrológicos y meteorológicos pueden causar brotes de enfermedades transmisibles al crear inundaciones y favorecer un ambiente en el cual proliferen enfermedades transmitidas por vector, producir rupturas de los sistemas de abastecimiento de agua y crear deficientes condiciones higiénico-sanitarias (Arcos *et al.*, 2002). Diversos estudios han relacionado la incidencia de ciertas enfermedades con eventos de precipitación y de inundaciones (Jusot y Alto, 2011; Kalinga-Chirwa *et al.*, 2011; Socolovschi *et al.*, 2011; Zacarías y Majlender, 2011). Un ejemplo de ello es la leptospirosis, de la cual su incidencia coincidió con un período de lluvias e inundaciones en Marseille, Francia (Hung *et al.*, 2011). De igual forma, la incidencia de malaria se ha relacionado con la época de lluvias (Jusot y Alto, 2011; Kalinga-Chikhwawa *et al.*, 2011; Socolovschi *et al.*, 2011; Zacarías y Majlender, 2011).

En México se ha estudiado muy poco el impacto de los desastres naturales sobre la salud humana, a pesar de ser uno de los países con mayor número de desastres hidrológicos y meteorológicos (Scheuren *et al.*, 2008). Guzmán-Tapia *et al.* (2005) encontraron en la península de Yucatán una mayor cantidad de *Triatoma dimidiata*, un vector transmisor de la enfermedad de Chagas, seis meses después de que esta área fuera afectada por el huracán Isidoro.

Efectos en la salud por cambios en la disposición de alimentos

Para las comunidades que dependen de la propia producción de alimentos, un desabasto de ellos puede causar problemas de desnutrición. Este problema puede ocurrir en eventos inesperados de sequía o fuertes lluvias, produciendo pérdidas en los cultivos o muerte del ganado. Además, el ataque de plagas a los cultivos o de enfermedades al ganado también puede reducir la cantidad de alimento en una comunidad. Para evitar el desabasto de alimentos, algunas comunidades han recurrido a una mayor heterogeneidad de cultivos y así reducir la probabilidad de perderlos enteros (Bryceson, 1989). También, en época de sequía, las comunidades cambian su fuente de abastecimiento de alimentos y se dedican a la caza y la colecta de comida en el hábitat natural (Grivetti, 1978; Fleuret, 1979).

Enfermedades transmitidas por vector (ETV)

En las dos últimas décadas ha habido un intenso debate sobre los efectos de las variables climáticas en la emergencia y transmisión de las ETV's, en el cual el papel de la temperatura y la precipitación pluvial están bien documentados (Kuno y Gubler, 1995; Koopman *et al.*, 1991; Foo *et al.*, 1985; Watts *et al.*, 1987; Gubler, 1998). Las evidencias sugieren que el cambio climático influye en el origen, la intensificación y la redistribución de estas enfermedades, siendo las más estudiadas el dengue, la malaria, la enfermedad de Chagas y la leishmaniasis (Epstein *et al.*, 1998; Patz *et al.*, 1996).

Dengue

Actualmente, la Fiebre por Dengue (FD) y sus manifestaciones graves (Fiebre Hemorrágica por Dengue y el Síndrome de Choque por Dengue, FHD/SCD) es la enfermedad causada por virus de mayor impacto en la salud pública mundial, ya que afecta particularmente a países tropicales y subtropicales donde, aproximadamente, la tercera parte de la población está en riesgo de padecer la enfermedad. Sin embargo, recientemente se han reportado brotes en regiones donde antes no se habían documentado casos, incluyendo zonas templadas. Anualmente se reportan alrededor de 100 millones de casos, miles de hospitalizaciones y casos fatales en más de 100 países, incluyendo México. Los brotes de FD se presentan en ciclos de duración variable, aunque recientemente han sido con mayor frecuencia e intensidad.

Por otro lado, se ha demostrado que en la génesis de los casos severos de la enfermedad pueden participar factores del individuo (por ejemplo, raza, edad, nutrición, perfil genético, etcétera), del virus (serotipos y genotipos), de los mosquitos vectores (abundancia, competencia vectorial, etcétera), factores sociales, económicos, geográficos y ambientales, entre otros.

Actualmente, en México, la mayoría de las entidades federativas reportan casos de FD y FHD cada año, particularmente durante la época de lluvias, aunque hay regiones donde la transmisión es durante todo el año. Entre los estados de la República que anualmente reportan casos de dengue, destacan: Colima, Chiapas, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, San Luis Potosí, Sinaloa, Tabasco y Veracruz, y recientemente se han notificado casos en estados de clima templado como Guanajuato y Baja California.

Es indudable que las modificaciones ambientales (variabilidad climática y cambio climático), asociadas con el incremento demográfico, el movimiento poblacional, los aspectos sociales y económicos, así como el deterioro en la infraestructura sanitaria y de servicios de salud, han sido factores importantes que han influido en

el incremento de los casos de FD y de sus manifestaciones severas, incluyendo los casos fatales (Ramos, 2010).

Dentro de la República Mexicana, se ha encontrado una relación entre la temperatura y la morbilidad por dengue en Veracruz, Colima y Guerrero (Riojas *et al.*, 2006). Para estos dos últimos estados, se calculó un incremento del 1.86% y 1.40% de casos de dengue por el aumento de un grado centígrado en la temperatura ambiente (Riojas *et al.*, 2006).

Malaria

La malaria es una enfermedad mortal causada por parásitos del género *Plasmodium* que se transmiten al ser humano por la picadura de mosquitos *Anopheles* infectados. Existen aproximadamente 400 especies de *Anopheles*, de las cuales 30 a 40 transmiten cuatro especies de parásitos que pueden infectar al hombre: *P.falciparum*, *P. vivax*, *P.malariae* y *P.ovale*; siendo la *P. falciparum* y *P. vivax* los más comunes y *P. falciparum* la más virulenta y mortal.

La malaria representa uno de los principales problemas de salud pública a nivel global, debido a su incidencia, extensión geográfica de las áreas de transmisión y costo económico. En el 2006 se presentaron 247 millones de casos de malaria en el mundo y casi un millón de muertes, principalmente en la población infantil del continente africano (OMS, 2008b).

El diagnóstico oportuno y el tratamiento de la malaria reducen el tiempo de enfermedad, los casos graves y las muertes, y contribuye a cortar el ciclo de la enfermedad persona-vector-persona (Hetzl *et al.*, 2007). La duración de dichos tratamientos depende de la cepa, siendo el régimen estándar de 14 días para la infección por *P. vivax*, responsable del 70% de los casos de malaria en América.

Las condiciones básicas para que ocurra la infección son a) la disponibilidad del parásito, el cual, en las áreas endémicas, puede ser proporcionado por recaídas de la enfermedad en sujetos previamente curados o por la re-introducción mediante movimientos migratorios, ya sea de humanos o de mosquitos infectados; b) la presencia de cantidades suficientes de mosquitos susceptibles y c) la presencia en la localidad de un número suficiente de humanos susceptibles. Para que la transmisión de malaria ocurra, además de la presencia de estos tres agentes, es necesario que exista contacto entre humanos y vectores.

La abundancia del vector, prevalencia de la infección con el parásito y las probabilidades de contacto humano-vector dependen de variables biológicas, geográficas, ambientales, demográficas y socio-económicas, así como del efecto de las intervenciones anti-maláricas y el acceso a los servicios de salud. Además, la

abundancia del vector está relacionada con la presencia de sitios disponibles para el desarrollo larvario de los mosquitos, que a su vez depende de la topografía, hidrología, precipitación pluvial, temperatura y disponibilidad de fuentes de alimento sanguíneo. Existe evidencia de que los cambios en los patrones climáticos impactan en la ecología y la biología de la malaria (Delgado *et al.*, 2004).

Diferentes estudios han reportado relaciones entre eventos climáticos y la incidencia de esta enfermedad (Poveda *et al.*, 2001a, 2001b; Githeko y Ndegwa, 2001), algunos han utilizado modelos espacio-temporales de transmisión (Bouma, 1996; Zhou *et al.*, 2004) y predicción (Patz *et al.*, 1998; Thomson *et al.*, 2004; Ceccato, 2004) basados en variables climáticas que han mostrado que las altas temperaturas y la presencia de lluvias podrían ampliar la zona geográfica de transmisión, así como el cambio en los patrones de ésta, utilizando escenarios de cambio climático (Tanser *et al.*, 2003; Patz y Olson, 2006).

En México, el 16.66% de la población posee algún riesgo de adquirir malaria (Guerra *et al.*, 2006; OMS, 2006). Los estados que poseen mayor morbilidad por esta enfermedad son Chiapas, Oaxaca, Durango, Nayarit, Chihuahua, Sinaloa, Sonora y Durango (Betanzos, 2011). Para Morelos solamente se ha registrado un caso entre el 2003 y 2010 (SSA, 2002-2010).

Enfermedad de Chagas

La enfermedad de Chagas, también llamada tripanosomiasis americana, es una enfermedad parasitaria causada por el protozoo flagelado, *Trypanosoma cruzi*, el cual es transmitido al ser humano a través de la deyección (después de la picadura) de ciertos insectos artrópodos hematófagos de la subfamilia Triatominae, (entre los que destacan: *Triatoma infestans*, *T. dimidiata*, *T. nitida*, *Rhodnius prolixus* y *R. pallidus*), o por otros medios, como son transfusiones sanguíneas y trasplante de órganos, así como por la ingesta de alimentos contaminados o, verticalmente, de la madre infectada al feto. El curso de la enfermedad de Chagas se divide en dos etapas: la etapa crónica y la etapa aguda. La fase aguda, también llamada etapa indeterminada, dura de seis a ocho semanas (en algunas personas puede extenderse indefinidamente), y generalmente ocurre sin manifestaciones clínicas detectables. Sin embargo, después de años de la transmisión, del 10% al 40% de los individuos seropositivos manifiestan la forma crónica de la enfermedad, con daño a órganos y tejidos, incluidos el corazón, sistema digestivo y nervioso periférico. Esta forma de la infección dura el resto de vida del individuo afectado.

El hábitat del vector y por consecuencia sus patrones de dispersión se encuentran determinados por factores climáticos y geográficos. En el medio ambiente, *Triatoma* preferentemente sobrevive en climas cálidos con temperaturas que oscilan entre los 16°C y los 32°C. La prevalencia del vector en zonas con inviernos fríos se puede

atribuir a la capacidad de *Triatoma* de buscar microclimas más cálidos que la temperatura ambiente, como son los hogares, así como la parte interior de algunas plantas.

En relación a factores geográficos, la distribución de *Triatoma* se relaciona con áreas tropicales y subtropicales con altitudes de entre 100 y 1,800 msnm. No obstante *T. infestans* se ha encontrado incluso a altitudes de 4,100 msnm, como es el caso de Bolivia (Monroy *et al.*, 2003). Por lo anterior, se infiere que cambios bruscos en las características de su hábitat modificarán los patrones de distribución y prevalencia de la enfermedad de Chagas en las zonas afectadas.

Factores como la tala de árboles, así como el incremento de la temperatura podrían producir una expansión del reservorio silvestre y de los vectores de *Trypanosoma cruzi* hacia las zonas de mayor concentración humana. Además de que estudios revelan que las altas temperaturas podrían acelerar el metabolismo de *Triatoma*, mientras que bajas concentraciones de humedad relativa podrían llevar a deshidratación, lo que impactaría en la frecuencia de alimentación, pues la sangre provee una importante cantidad de agua (Carcavallo, 1999). Así, el incremento global de la temperatura afectaría la prevalencia de esta enfermedad en zonas endémicas y aun en aquellas donde se considera ha sido erradicada exitosamente (OMS, 2002).

Se estima que en México el 1.5% de la población tiene la enfermedad de Chagas (Ramsey *et al.*, 2003). La mayoría de los casos (69%), se concentra en los estados de Chiapas, Veracruz, Guanajuato, Hidalgo, Puebla, Michoacán, México y Oaxaca (Ramsey *et al.*, 2003). Morelos ocupa el lugar 21 a nivel nacional en cuanto a casos de la enfermedad de Chagas (Ramsey *et al.*, 2003). En la zona metropolitana de Cuernavaca se ha identificado el vector *Trypanosoma cruzi* y *T. pallidipennis*, mientras que la sangre analizada de donadores de sangre en este mismo estado resultó positiva a la presencia de anticuerpos de *T. cruzi* (Ramsey *et al.*, 2005).

Enfermedades transmitidas por agua y alimentos

Las alteraciones en los patrones de precipitación asociados a los cambios climáticos tienen un impacto sobre la disponibilidad de agua superficial y su calidad, que podrían afectar la carga de enfermedad de origen hídrico.

Las enfermedades diarreicas agudas (Chinchilla *et al.*, 2006) presentan un patrón estacional, observándose una mayor incidencia en las temporadas cálidas donde se favorece la propagación de patógenos (Lesmana y Subekti, 2001). Además, los cambios en patrones globales de precipitación contribuyen al brote de estas enfermedades (Patz *et al.*, 2008). En países de clima templado las infecciones virales predominan en invierno, mientras que en los países tropicales los casos suelen

ocurrir durante todo el año, aumentando su frecuencia durante la estación seca y los meses más fríos; mientras que las diarreas por bacterias tienden a suceder con mayor frecuencia en los meses más cálidos de la estación lluviosa. Además, el fenómeno de El Niño oscilación del Sur (ENOS) ha demostrado ser un potencial factor que influye en eventos climáticos extremos y la transmisión de enfermedades infecciosas. El inusual calentamiento de las aguas oceánicas del Pacífico tropical altera la ecología regional y local. Los factores extremos propiciados por estos sucesos (inundaciones, lluvias copiosas y elevadas temperaturas) han estado asociados a incrementos en admisiones hospitalarias por enfermedades diarreicas agudas (EDAs), debido a que incrementos en la temperatura favorecen la proliferación de bacterias y parásitos que se ingieren a través del agua de consumo humano (Checkley *et al.*, 2000; Hashizume *et al.*, 2007). Además se ha demostrado que las visitas a urgencias por infecciones gastrointestinales están relacionadas con la turbidez del agua para beber, controlada por el efecto de la temperatura (Schwartz *et al.*, 1997). Otros estudios muestran asociación entre EDAs y el consumo de mariscos crudos, mal cocidos o alimentos contaminados, presentando la mayor incidencia durante los meses cálidos (Tangkanakul *et al.*, 2000; Daniels *et al.*, 2000).

Por otro lado, algunos estudios sugieren que el cambio climático también puede afectar la salud a través de sus efectos sobre las floraciones nocivas de fitoplancton o algas que se desarrollan en aguas superficiales, estuarios y aguas costeras en cantidad suficiente para producir un cambio en la coloración del agua (Harvell *et al.*, 1999). Otros estudios reportan que su proliferación podría incrementarse por cambios en la temperatura superficial del mar (TSM) que junto con la fuerza de los vientos son procesos mediadores entre la proliferación de especies de fitoplancton tóxico y la intoxicación en humanos por consumo de moluscos (Colwell, 1996).

La mortalidad por EDA's en México ha disminuido drásticamente desde la mitad del siglo pasado. En 1960, la muerte por EDA's ocupaba el primer lugar pero descendió al décimo en 1990, esto como resultado del programa de hidratación oral que se aplicó en 1984 (Terrés y Torres, 2002). A pesar de ello, esta enfermedad sigue afectando a una gran proporción de la población mexicana y se posiciona en segundo lugar en morbilidad con una tasa de 3,100 casos por cada 100,000 habitantes, siendo los más afectados los niños menores a cinco años (IMSS, 1989; Dirección General de Estadística, 1990; Garrido *et al.*, 1990; Kumate, 1990). En Morelos, las infecciones y amibiasis intestinales son la segunda y cuarta causa de morbilidad, respectivamente. Una fuente de transmisión podría ser la toma de aguas contaminadas; se ha observado que varios acuíferos en Morelos se encuentran contaminados con coliformes fecales, lo que puede ocasionar enfermedades diarréicas. Tal es el caso de los acuíferos de Cuernavaca, Cuautla-Yautepec y Zacatepec (Ramírez *et al.*, 2009; Robles-Valderrama *et al.*, 2009; Robles-Valderrama *et al.*, 2010). Además, en el acuífero de Zacatepec se observó que la

cantidad de coliformes totales y fecales variaron a lo largo del año, encontrándose la mayor cantidad de ellos entre abril y julio (Ramírez *et al.*, 2009). Este fenómeno podría coincidir con el aumento de la temperatura durante estos meses.

Zoonosis

Las zoonosis son enfermedades transmitidas de los animales vertebrados a los humanos y algunas presentan patrones estacionales. Los cambios en los patrones de temperatura y precipitación pueden afectar la dinámica de las poblaciones de animales silvestres y, en menor proporción, domésticos, lo cual a su vez influye en la transmisión de enfermedades. Algunas enfermedades zoonóticas comunes son la leishmaniasis y la leptospirosis.

Leishmaniasis

La leishmaniasis es una enfermedad parasitaria causada por más de 20 especies diferentes de protozoos del género *Leishmania*, transmitida al ser humano y animales a través de la picadura de insectos hematófagos, hembras de la familia Phlebotominae, que incluye a los géneros *Phlebotomus* y *Lutzomia* en Europa y América Latina, los cuales sobreviven preferentemente en climas cálidos y húmedos (Azpurua *et al.*, 2010). La infección al hombre se puede dar a partir de parásitos provenientes de un reservorio animal (ciclo zoonótico), o a partir de parásitos que el vector ha tomado de otro hospedero humano (ciclo antroponótico). La sintomatología clínica de la leishmaniasis puede presentarse como enfermedades: cutánea (LC), cutánea americana (LCA), mucocutánea (LMC), cutánea difusa (LCD) y visceral (LV). A las formas cutáneas también se les conoce como leishmaniasis tegumentarias. A su vez, la leishmaniasis cutánea presenta una forma no ulcerada conocida como leishmaniasis cutánea atípica (Nogueira *et al.*, 2005).

La leishmaniasis es una enfermedad de distribución global, endémica de al menos 88 ciudades del mundo, y se considera que 350 millones de personas están en riesgo de contraer la infección. Sin embargo, existe mayor prevalencia en Latinoamérica, el sur de Asia y África, por lo que la carga de la enfermedad se encuentra relativamente concentrada. El 90% de los casos de LV ocurren en India, Asia, Brasil y América, y el 90% de los casos de LC se presentan en países de Asia y el Centro y Sur de América (Bern *et al.*, 2008).

En América Latina, los agentes más importantes de las LC, LV y LCA son *L. braziliensis*, *L. guyanensis*, *L. panamensis*, *L. mexicana* y *L. infantum*, los cuales son transmitidos principalmente por especies caninas a humanos a través de vectores del género *Lutzomia*. Cada una de las especies presenta distintos patrones

epidemiológicos y demográficos. Los países más afectados son: Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, México, Perú y Venezuela (Salud en las Américas, 2007).

La leishmaniasis se presenta en 17 estados de México, la mayor parte de ellos localizados en la vertiente del Atlántico y del Pacífico. El principal vector que transmite esta enfermedad es *Lutzomyia olmeca olmeca*, aunque también *L. cruciata*, *L. panamensis*, *L. shannoni* y *L. ylephiletor* se han encontrado infectados (González *et al.*, 2011).

Leptospirosis

La leptospirosis es causada directamente por espiroquetas pertenecientes a diferentes especies patógenas del género *Leptospira*, y los animales actúan como portadores o vectores. La infección en los humanos se da por contacto accidental con animales portadores o con el medio ambiente contaminado con leptospirosis, cuya principal fuente es la orina del animal excretor, siendo los más frecuentes las ratas, perros, bovinos, equinos y porcinos.

La mayoría de las infecciones por leptospirosis son sub-clínicas o resultan en una enfermedad muy leve y se recuperan sin ninguna complicación; sin embargo, una pequeña proporción desarrolla diversas complicaciones debido a la implicación de múltiples sistemas orgánicos. En estos pacientes, la manifestación clínica depende de los órganos involucrados y la tasa de letalidad puede ser alrededor del 40% o más (Ashford *et al.*, 2000).

La leptospirosis es a menudo mal diagnosticada y no se reporta. Aunque los principios básicos de la prevención, como son la reducción de la fuente, el saneamiento ambiental, la higiene laboral y personal, etcétera, son iguales en todas partes, no hay ningún método de control universal. La completa comprensión de las características epidemiológicas, ecológicas y culturales de una comunidad que se enfrenta al problema de la leptospirosis son elementos esenciales para desarrollar e implementar medidas de control eficaces y aceptables (Ashford *et al.*, 2000).

La leptospirosis ha sido reconocida como un problema global emergente de salud pública debido a su creciente incidencia tanto en los países en desarrollo como en los desarrollados. Brotes de leptospirosis se han producido en los últimos años en lugares como Nicaragua, Brasil y la India. Algunos de ellos se produjeron debido a inundaciones después de un evento hidrometeorológico (Vijayachari *et al.*, 2008).

En México, la leptospirosis se ha encontrado en animales que viven en el entorno humano, como, por ejemplo gatos, perros, ratas, ganado bovino y porcino (Cisneros *et al.*, 2002; Sepúlveda *et al.*, 2002; Luna *et al.*, 2005; Navarrete-Espinosa *et al.*, 2006). En Morelos se ha observado la presencia de leptospirosis, principalmente

en el ganado bovino. Esto podría representar un peligro para la salud humana, ya que se ha visto que la probabilidad de infectarse de leptospirosis aumenta cuando la gente se encuentra en constante contacto con animales infectados (Navarrete-Espinosa *et al.*, 2006).

Efectos en la salud relacionados con la contaminación del aire

Uno de los temas relevantes del cambio climático es el incremento de la temperatura en ciudades con problemas de contaminación atmosférica, debido a que las condiciones climáticas condicionan de manera directa la acumulación o dispersión de los contaminantes (Ebi y McGregor, 2009). Estos contaminantes presentan distinto potencial para producir daño a la salud humana dependiendo de sus propiedades físicas y químicas, de la dosis que se inhala, del tiempo y frecuencia de exposición, además de las características de la población expuesta.

Entre los contaminantes más importantes, debido a la dificultad de su control y a sus impactos en la salud humana, se encuentran el ozono y el material particulado. Ambos contaminantes son sensibles al clima, aunque el ozono en mayor medida, ya que es un contaminante secundario formado en la atmósfera a través de reacciones entre contaminantes primarios (como son, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles) y radiación solar. En consecuencia, su variabilidad interanual y sus niveles en la atmósfera se relacionan con las condiciones climáticas calurosas (Liao *et al.*, 2007).

Estudios recientes han evaluado los riesgos de mortalidad asociados al aumento en los niveles de ozono atribuido a los cambios de la temperatura. Así durante distintas olas de calor ocurridas en Londres, durante los años 2003, 2005 y 2006, se registró un exceso de 6,000 muertes atribuibles a los niveles de ozono y 5,000 relacionadas directamente con el efecto de la temperatura (Doherty *et al.*, 2009). Además, el incremento en las concentraciones de ozono se ha asociado con niveles más altos de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias (Schwartz, 1994), asma (Moore *et al.*, 2008) y enfermedad pulmonar obstructiva crónica (Schwartz, 1994; Moolgavkar *et al.*, 1997; Medina-Ramon *et al.*, 2006) en las personas de 65 años y más.

La mayoría de los estudios para México se han realizado en el Distrito Federal, esto porque es la ciudad más grande del país y sus niveles de contaminantes siempre están elevados durante la mayor parte del año (Téllez *et al.*, 1997). La mayoría de ellos concuerda con que los contaminantes atmosféricos (como son el ozono y el PM10) aumentan la morbi/mortalidad de la población (Romieu *et al.*, 1996; Téllez *et al.*, 1997; O'Neill *et al.*, 2004). En dos escuelas de Salamanca, Guanajuato, se observó una mayor frecuencia en síntomas respiratorios en niños de entre seis y 14 años de edad que se encontraban más cerca del sector industrial (Linares *et al.*,

2010). Además, la incidencia de enfermedades respiratorias posee un patrón estacional, presentándose más casos en época invernal (Téllez *et al.*, 1997; Linares *et al.*, 2010).

En Morelos aún no se cuenta con estudios similares, debido en parte a la falta de los datos de salud, o en algunos casos de monitoreo atmosférico. No obstante, la zona requiere especial atención, principalmente en la zonas de cultivo de caña, ya que durante su cosecha, la cantidad de contaminantes atmosféricos aumentan, pudiendo incrementar las incidencias de enfermedades respiratorias (Cançado *et al.*, 2006; Rossi *et al.*, 2007; Rossi *et al.*, 2010). Por ejemplo, en Piracicaba, Brasil, se observó un aumento en la suspensión de las partículas debido a la quema de caña de azúcar, lo cual, a su vez, incrementó las incidencias en enfermedades respiratorias (Rossi *et al.*, 2007). Por lo tanto, las etapas del procesamiento de este cultivo podrían coincidir con un aumento en las enfermedades respiratorias.

Objetivos

Objetivo general

Desarrollar un diagnóstico de la relación entre clima y salud a través de la evaluación de enfermedades asociadas al cambio y a la variabilidad climática en Morelos para orientar futuras investigaciones, así como para que los tomadores de decisiones determinen estrategias y políticas para minimizar o adaptarse a sus impactos.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión sistemática de la literatura indexada así como de reportes, informes técnicos y publicaciones en bases de datos electrónicas de eventos en salud, asociados al cambio climático en el estado de Morelos.
- Seleccionar enfermedades sensibles al clima, prioritarias en términos de salud pública en Morelos.
- Desarrollar un análisis regional sobre los impactos de las variaciones climáticas en la salud de la población en el estado de Morelos.
- Elaborar recomendaciones a partir de los hallazgos, para orientar futuras investigaciones.

Metodología

Para el desarrollo de este estudio, se realizó inicialmente una revisión bibliográfica en publicaciones en revistas científicas indexadas sobre los efectos potenciales del cambio climático en la salud humana. Se seleccionaron aquellos artículos en los que se encontrara alguna asociación de variables en salud y climáticas utilizando

métodos estadísticos. Esta búsqueda bibliográfica dio como resultado una serie de enfermedades que se han asociado al cambio climático en diferentes regiones del mundo (Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Enfermedades asociadas al cambio climático y su código en la Clasificación Internacional de Enfermedades.

Causa de Muerte o Enfermedad	Clave CIE 9	Clave CIE 10
	1979 - 1997	1998 - 2003
Dengue hemorrágico	65.4	A91
Golpe de calor	E900.0	X30
Exposición a frío excesivo	E901.0	X31
Enfermedades infecciosas intestinales	E001 - E009	A00 - A09
Infecciones respiratorias agudas	460 - 466	J00 - J06 y J20 - J22
Intoxicación por alimentos relacionada con marea roja	E865.1	T61.0, T61.2 y T61.8
Víctima de desastres naturales, huracanes e inundaciones	E908	X37 y X38

Para poder estudiar las asociaciones en Morelos, se analizó, por un lado, la plausibilidad de que las enfermedades asociadas al cambio climático en otros países pudieran presentarse en la población mexicana, esto mediante la búsqueda de evidencia bibliográfica de diferentes enfermedades dentro del estado.

El siguiente paso fue obtener datos sobre morbilidad en Morelos del Sistema Único de Vigilancia Epidemiológica. Esta base de datos incluye todas las enfermedades que se registraron durante el período 1999-2007. La información se filtró, seleccionando solamente las enfermedades de la tabla 2, y se construyó una base de datos que contenía 284,999 registros de morbilidad diaria, cada uno con su respectiva semana epidemiológica de diagnóstico y clave de municipio. Usando esta base de datos se creó otra en la cual se incluía la morbilidad diaria de cada enfermedad por municipio. Como en el análisis se utilizaría la semana epidemiológica como unidad de tiempo, la morbilidad diaria se sumó para obtener la morbilidad por semana epidemiológica.

Tabla 6.2. Enfermedades asociadas al cambio climático importantes en Morelos y su código en la Clasificación Internacional de Enfermedades

Causa de Enfermedad	CIE 10
Desnutrición	E40-E44.1
Dengue clásico y hemorrágico	A90, A91, A92.0
Paludismo	B50 - B51
Enfermedad de Chagas	B57-B58
Enfermedades infecciosas intestinales	A00 - A09
Leshmaniasis	B55
Leptospirosis	A27
Infecciones respiratorias agudas	J00-J01, J02.8-J02.9, J03.8-J06, J20, J21
Picadura de alacrán	T63.2, X22
Tuberculosis pulmonar	A15-A16

La base de datos meteorológicos fue proporcionada por la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo, y cuenta con el registro diario de temperatura promedio, mínima, máxima y precipitación de 23 estaciones meteorológicas de Morelos entre los años 1999 y 2007 (Tabla 6.3).

El estado se dividió en tres regiones climáticas (semifría, semicálida y cálida) y a cada región se le asignó un grupo de municipios según el clima que presentaran (Tabla 6.4, Figura 6.2). En aquellos municipios en donde convergieran varios tipos de climas, se observó cuál predominaba en las concentraciones urbanas y posteriormente se le asignó a una región. A su vez, a cada región climática se le asignaron un grupo de estaciones meteorológicas para describir su clima. Los datos de las estaciones de cada región se promediaron para obtener valores diarios de temperatura mínima, máxima y precipitación. Posteriormente, se obtuvo un promedio semanal de la temperatura mínima y máxima y un acumulado semanal de la precipitación. Se realizaron análisis de varianza por cada variable climática para corroborar que las tres regiones poseían distintos climas.

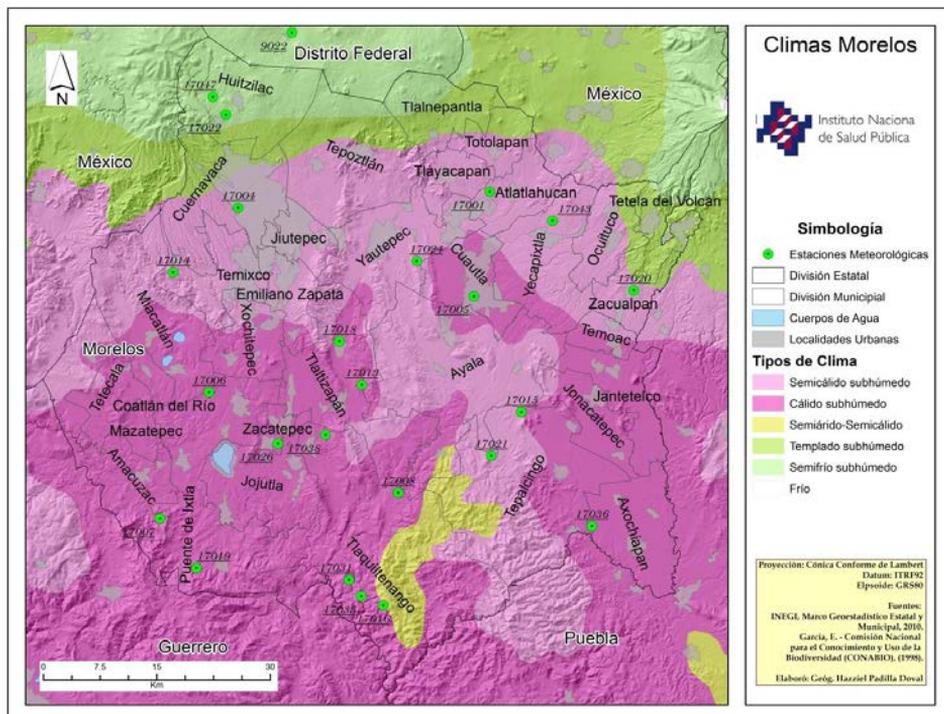


Figura 6.2. Climas y estaciones meteorológicas en el estado de Morelos

Tabla 6.3. Información de las 22 estaciones meteorológicas utilizadas en Morelos

CLAVE	ESTACION	LAT_Y	LONG_X	ALTITUD (msnm)
17001	Atlatlahuacan	18.93667	98.92806	1656
17004	Cuernavaca (DGE)	18.92333	99.245	1529
17005	Cuautla (DGE)	18.81028	98.95083	1309
17006	El Rodeo	18.70028	99.28611	1200
17007	Huajintlán	18.54861	99.35056	1049
17008	Huautla	18.57417	99.05111	971
17013	Temilpa	18.70583	99.09389	1000
17014	Temixco (DGE)	18.84639	99.32833	971
17016	Tequesquitengo	18.43806	99.07278	970
17018	Ticuman	18.75917	99.12111	1130
17019	Tilzapotla	18.48778	99.30611	1200
17020	Tlacotepec	18.81333	98.75	1302
17021	Tlacualera (S. F. Neri)	18.61667	98.93361	1560
17022	Tres Cumbres	19.03667	99.25806	2800
17024	Yautepec	18.85444	99.02167	1150
17026	Zacatepec (A.C.A.E. La Victoria)	18.63667	99.20083	1226
17031	Jojutla (SMN)	18.47	99.115	891
17033	Xicatlacotla (CFE)	18.45	99.1	1000
17036	Lagunillas de Rayon	18.52889	98.80917	1100
17038	Nexpa	18.64611	99.14083	1230
17043	Yecapixtla E.T.A. 118	18.9	98.85	1690
17047	Huitzilac (DGE)	19.05833	99.27417	2850

Tabla 6.4. Municipios que conforman cada región en Morelos

Región	Municipio	Clave estaciones meteorológicas
Templada	Huitzilac	17022 y 17047
	Tetela del volcán	
	Tlalnepantla	
Semicálida	Ayala	17001, 17004, 17014, 17020, 17021, 17024 y 17043
	Cuernavaca	
	Emiliano Zapata	
	Jiutepec	
	Tepoztlán	
	Atlatlahucan	
	Ocuituco	
	Temixco	
	Temoac	
	Tlayacapan	
	Totolapan	
	Yautepec	
	Yecapixtla	
Zacualpan de Amilpas		
Cálida	Amacuzac	17005, 17006, 17007, 17008, 17013, 17016, 17018, 17019, 17026, 17031, 17033, 17036 y 17038
	Axochiapan	
	Coatlán del río	
	Cuautla	
	Jantetelco	
	Jojutla	
	Jonacatepec	
	Mazatepec	
	Miacatlán	
	Puente de Ixtla	
	Tepalcingo	
	Tetecala	
	Tlaltizapán	
	Tlaquilenango	
	Xochitepec	
Zacatepec de Hidalgo		

Para poder analizar la asociación entre las variables climáticas y los eventos en salud, el primer paso fue graficar sus tendencias históricas, con la finalidad de realizar una potencial asociación entre el clima y las enfermedades seleccionadas. Para ello, se realizaron gráficas de series de tiempo con datos de temperatura mínima y máxima promedio semanal y precipitación acumulada semanal junto con la morbilidad de cada enfermedad por semana epidemiológica.

Posteriormente, se realizaron tablas de correlaciones de Pearson para observar la asociación entre variables climáticas y morbilidad. El manejo de bases de datos, preparación de la información epidemiológica y análisis estadístico se realizó utilizando R (R Development Core Team, 2011).

A partir de los resultados de dichas asociaciones se realizaron una serie de recomendaciones sobre las prioridades de investigación en el estado de Morelos que permitan comprender el impacto real de este fenómeno en la salud.

Resultados

A partir de una revisión bibliográfica de artículos relacionados con el estudio del impacto de la variabilidad y cambio climático en la salud de las poblaciones humanas, se seleccionaron las siguientes causas de morbi-mortalidad como indicadores adecuados para el análisis diagnóstico de la situación en Morelos.

Desnutrición

La Encuesta Nacional de Salud y Nutrición (Olaiz-Fernández, 2006) muestra para Morelos que el 6% de los preescolares presentan bajo peso y el 12.2% baja talla. Para el caso de escolares y adultos, el 7.6% y el 9.5% de la población morelense mostraron baja talla, respectivamente. En Hueyapan, Morelos, el 42% y el 62% de los niños entre 0-11 y 12-59 meses de edad presentan desnutrición leve y moderada, respectivamente (Olaiz-Fernández, 2006); sin embargo, su tasa por 100,000 habitantes ha disminuido un poco menos de la mitad entre el período 2000 y 2007 (SUIVE, Figura 6.3a).

Dengue clásico y hemorrágico

En Morelos se ha detectado el dengue, el cual presenta una tasa de morbilidad de 179 por 100,000 habitantes (Figura 6.3b; Sistema Único Automatizado de Vigilancia Epidemiológica, 2006; Secretaría de Salud, 2007). El estado registró el brote de dengue más importante de su historia durante 2008 con 5,953 casos acumulados de fiebre por dengue (FD) y 2,165 casos de fiebre hemorrágica por dengue (FHD), con una tasa de incidencia de 489 por 100,000 habitantes y una tasa de letalidad de 0.7 por 100 casos (Villegas *et al.*, 2011). Para el caso de Temixco, en 2002 se detectó un caso de dengue hemorrágico y 37 casos de dengue clásico; para el 2005 fueron 11 casos de hemorrágico y en 2006, fueron 20 casos de dengue clásico y dos del hemorrágico (Sistema Único Automatizado de Vigilancia Epidemiológica, 2006; Secretaría de Salud, 2007)

Paludismo

Existen registros de malaria en Morelos antes de 1960, siendo el principal vector el mosquito *Anopheles pseudopunctipennis* (Vargas *et al.*, 1941; Bordas y Downs, 1951). La incidencia de malaria era mayor en poblaciones cercanas a campos de cultivos de arroz donde el mosquito se encontraba con frecuencia dentro de las casas (Vargas *et al.*, 1941). *A. pseudopunctipennis* se encuentra infectado de forma natural y muestra una preferencia por la sangre humana (Vargas *et al.*, 1941); sin embargo, actualmente se encuentra erradicado de Morelos y solamente en 2003 se presentó un caso (SSA, 2002-2010).

Enfermedad de Chagas

En Morelos, el 77% de las comunidades urbanas y suburbanas están infectadas con el vector del Chagas (Ramsey *et al.*, 2005). En la zona metropolitana de Cuernavaca se identificaron como principales vectores al *Trypanosoma pallidipennis* dentro del 4.1% de las viviendas, y al *T. cruzi*, que se encontró en un 50% de los casos en insectos (Ramsey *et al.*, 2005). Además, mediante análisis de sangre en hospitales del estado se observó que en el 17% de las muestras había anticuerpos contra *T. cruzi* (Rangel *et al.*, 1998); por ello, su tasa no es muy alta y en el período 1999-2007 no ha sido mayor a seis habitantes por cada 100,000 (Figura 6.3c).

Enfermedad Diarréica Aguda (EDA)

La morbilidad por EDA's sigue siendo un asunto importante para el estado, aunque ha disminuido en los últimos años (Figura 6.3d). En 2002, el Sector Salud de Morelos reportó que ese año el 13% de la población padeció alguna enfermedad diarreica; la mayor parte de éstas se transmite por medio de aguas contaminadas, siendo las más comunes las infecciones intestinales por otros organismos (67%) y la amebiasis intestinal (19%) (Chacón y Leal, 2006).

Según datos del Gobierno del Estado de Morelos (2003), los municipios de Tlaltizapán, Puente de Ixtla, Amacuzac, Jojutla, Axochiapan, Ayala, Cuautla, Jantetelco, Jonacatepec, Xochitepec, Jiutepec y Temixco son considerados como de alto riesgo en cuanto a enfermedades diarreicas agudas debido a dos factores: altas temperaturas y número de casos que se presentan.

Leshmaniasis

El primer caso de leishmaniasis visceral (LV) en Morelos se registró en los 80's, siendo *Leishmania donovani chagasi* el parásito transmisor de dicha enfermedad (Velasco-Castrejón *et al.*, 2004). La LV es endémica en los estados de Chiapas, Guerrero y Morelos (Hernández-Ruiz y Becker, 2006).

Leptospirosis

En Morelos se ha observado la presencia de leptospirosis, principalmente en el ganado bovino. Del total de las muestras de sangre de ganado bovino en Morelos, el 33.2% resultó positivo a la leptospirosis, y se encontraron 12 serotipos, de los cuales las variedades *hardjo cepa H-89*, *wolffi* y *hardjo* fueron las más comunes. Entre el 2006 y 2010 se han registrado casos de leptospirosis en la población humana, siendo el 2009 el año con mayor número de casos, con tres personas (SSA, 2006-2010).

Infección Respiratoria Aguda (IRA)

A pesar de que la tasa de morbilidad por infecciones respiratorias agudas ha disminuido desde el 2000, siguen siendo el primer lugar en Morelos con 27,211 casos en 2010 (Figura 6.3e, SSA, 2002-2010).

Picadura de alacrán

Morelos tiene una alta morbilidad de envenenamiento por picadura de alacrán a nivel nacional, encontrándose en el tercer lugar después de Jalisco y Guerrero (SSA, 2002-2010). El promedio de incidencias por picadura de alacrán en el estado fue de 1,778 casos por 100,000 habitantes entre el 2002 y 2010, siendo la quinta causa de morbilidad (Figura 6.3f, SSA, 2002-2010). Aunque la mortalidad por picadura de alacrán ha disminuido en Morelos, en el período del 2001 y 2003 se registraron 24.70 muertes por cada 100,000 habitantes (Celis *et al.*, 2007).

Tuberculosis Pulmonar (TB)

La tasa de TB en Morelos ha ido disminuyendo de 9.48 casos en 2002 a 7.42 casos por cada 100,000 habitantes (Figura 6.3g, SSA, 2002-2010).

Variables climáticas

Las tres variables climáticas mostraron un patrón estacional durante cada año, aumentando en primavera y verano (entre marzo y octubre) para después disminuir en el resto del año (Figura 4). La temperatura mínima, máxima y precipitación difirieron entre las regiones ($F = 1810$, $df = 2$, $p < 0.001$; $F = 5479$, $df = 2$, $p < 0.001$; $F = 52.66$, $df = 2$, $p < 0.001$, respectivamente; Figura 6.4).

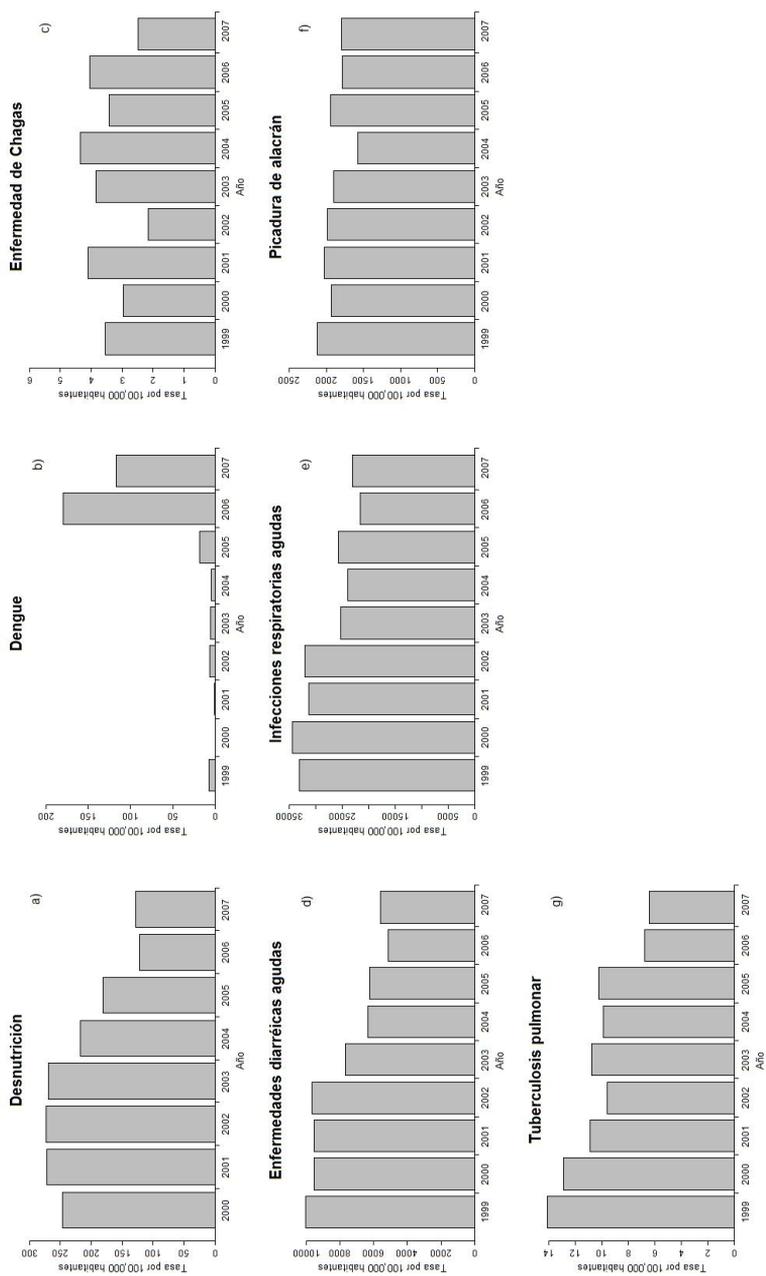


Figura 6.3. Tasa por 100,000 habitantes en el período 1999-2007 (excepto desnutrición, período 2000-2007). a) desnutrición, b) dengue, c) enfermedad de Chagas, d) enfermedades diarreicas agudas, e) infecciones respiratorias agudas, e) picadura de alacrán, y g) tuberculosis pulmonar en Morelos, México. Fuente: SSA, 2002-2010.

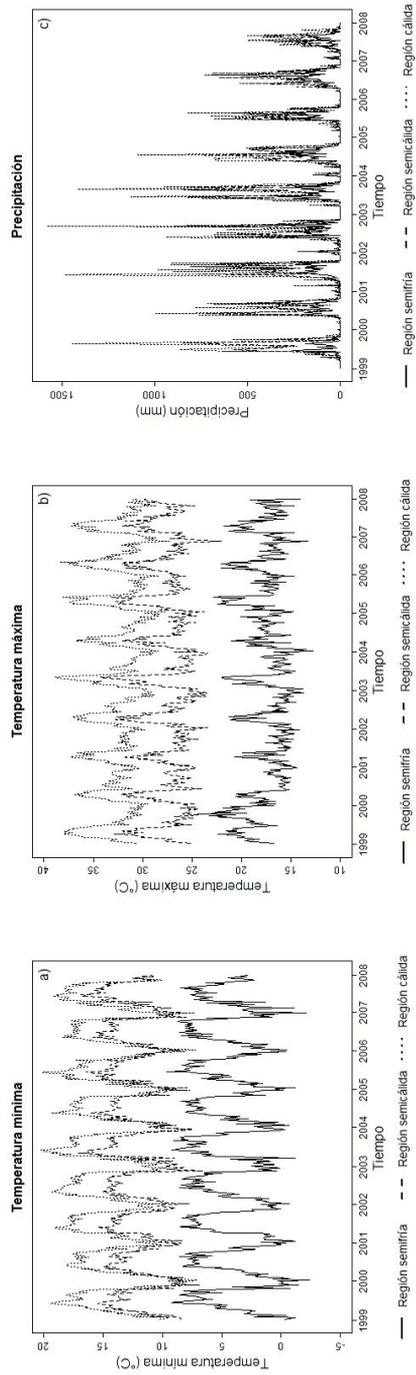


Figura 6.4. Variables climáticas del estado de Morelos. a) Temperatura mínima, b) temperatura máxima, y c) precipitación en la región semifría, semicálida y cálida en Morelos

Análisis de enfermedades

Todas las enfermedades tuvieron una correlación significativa con al menos una variable climática en alguna de las regiones (excepto la tuberculosis; Tabla 6.5). Sin embargo, la región semifría fue la que presentó una menor cantidad de correlaciones comparada con las demás regiones. En general, las enfermedades respiratorias (asma, neumonías y bronconeumonías) tuvieron correlaciones negativas con las variables climáticas, mientras que lo contrario ocurrió con las EDA's y la picadura de alacrán.

Tabla 6.5. Matriz de correlación entre las enfermedades y las variables climáticas en la región norte y sur de Morelos

Enfermedad	Región semifría			Región semicálida			Región cálida		
	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Precipitación	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Precipitación	Temperatura mínima	Temperatura máxima	Precipitación
Asma	-0.07	0.07	-0.07	-0.36*	-0.29*	-0.13*	-0.24*	-0.21*	-0.10*
Chagas	0.03	-0.04	0.04	0.04	-0.08	0.11*	-0.12*	-0.12*	-0.04
Dengue	0.05	-0.003	0.04	0.13*	-0.14*	0.08	0.14*	-0.22*	0.05
Desnutrición	0.06	-0.001	0.03	-0.08	0.07	-0.08	0.01	0.19*	-0.08
EDA's	0.45*	0.16*	0.29*	0.18*	0.002	0.29*	0.36	0.12*	0.41*
IRA's	-0.30*	-0.02	-0.24*	-0.58*	-0.18*	-0.36*	-0.58*	-0.13*	-0.40*
Neumonías y bronconeumonías	0.01	0.06	-0.04	-0.31*	-0.20*	-0.16*	-0.30*	-0.30*	-0.16*
Picadura alacrán	0.13*	-0.05	0.06	0.63*	0.49*	0.18*	0.59*	0.65*	0.06
Tuberculosis	0.03	0.06	-0.004	0.01	-0.01	0.02	0.06	0.04	0.07

*Valores estadísticamente significativos (p < 0.05)

Asma

El asma mostró una correlación negativa en las tres regiones, excepto para la temperatura máxima en la región semifrías. En la región semicálida y cálida esta correlación fue significativa con las tres variables climáticas (Tabla 6.5, Figura 6.5).

Enfermedad de Chagas

La enfermedad de Chagas mostró una correlación positiva en la región semicálida con la precipitación y una correlación negativa con la temperatura mínima y máxima en la región cálida, mientras que en la región semifrías no se encontró una correlación significativa (Figura 6.6).

Dengue

En la región semifrías no hubo correlación entre la morbilidad por dengue y las variables climáticas. Por otro lado, en la región semicálida y cálida se observó una correlación negativa entre la incidencia de dengue y la temperatura máxima, y una positiva con la temperatura mínima (Figura 6.7).

Desnutrición

La desnutrición solamente mostró una correlación positiva en la región cálida con la temperatura máxima, incrementándose el número de casos en la época de calor. (Figura 6.8).

EDA's

En las tres regiones climáticas se observaron correlaciones positivas con las tres variables climáticas. Solamente en la región semicálida no se encontró una correlación con la temperatura máxima (Figura 6.9). En las tres regiones, los registros más altos de morbilidad en cada año se registran meses después de que la temperatura mínima y máxima alcanzan sus valores máximos. Para el caso de la precipitación, el aumento en la morbilidad coincide con los meses en donde se registra una mayor precipitación (Figura 6.9).

IRA's

Las IRA's siempre tuvieron una correlación negativa con todas las variables climáticas en las tres regiones, siendo la única excepción la región semifrías en la que se encontró solamente una correlación entre la temperatura mínima y la precipitación (Figura 6.10).

La mayor morbilidad se encontró cuando la temperatura mínima, máxima y la precipitación alcanzaban sus valores más bajos (Figura 6.9).

Neumonías y bronconeumonías

En la región semifría no se encontró ninguna correlación con alguna variable climática, mientras que en la región semicálida y cálida, la morbilidad tuvo una correlación negativa con todas las variables climáticas (Figura 6.11). Al igual que con las IRA's, los mayores registros de morbilidad coincidieron con los menores valores de temperatura mínima, máxima y precipitación (Figura 6.11).

Picadura de alacrán

La incidencia de picaduras de alacrán siempre tuvo una correlación positiva en las tres regiones. En la región semifría, su incidencia se asoció con la temperatura mínima, en la región semicálida tuvo una correlación con las tres variables climáticas, y en la región cálida con la temperatura mínima y máxima; sin embargo, los mayores valores en las correlaciones se observaron con la temperatura mínima y máxima en la región semicálida y cálida (Figura 6.12).

Tuberculosis

En ninguna de las tres regiones se encontró una correlación significativa con alguna variable climática (Figura 6.13).

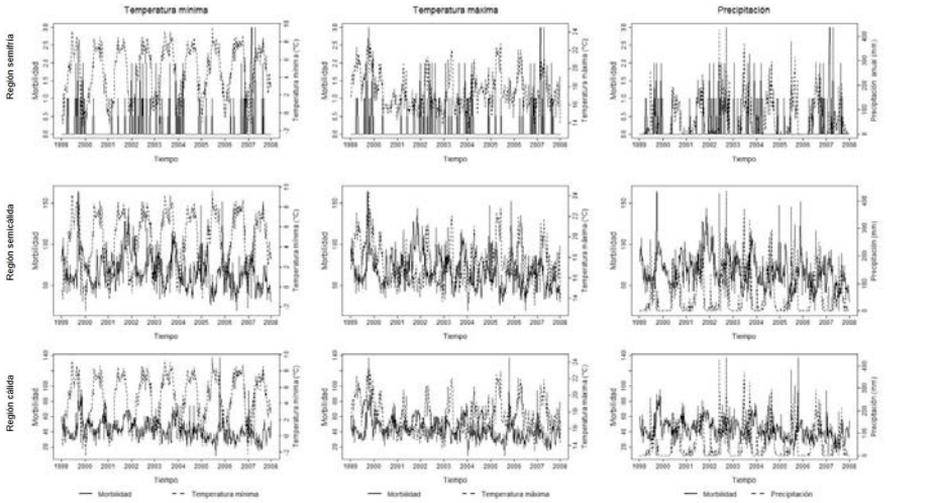


Figura 6.5. Morbilidad por asma y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

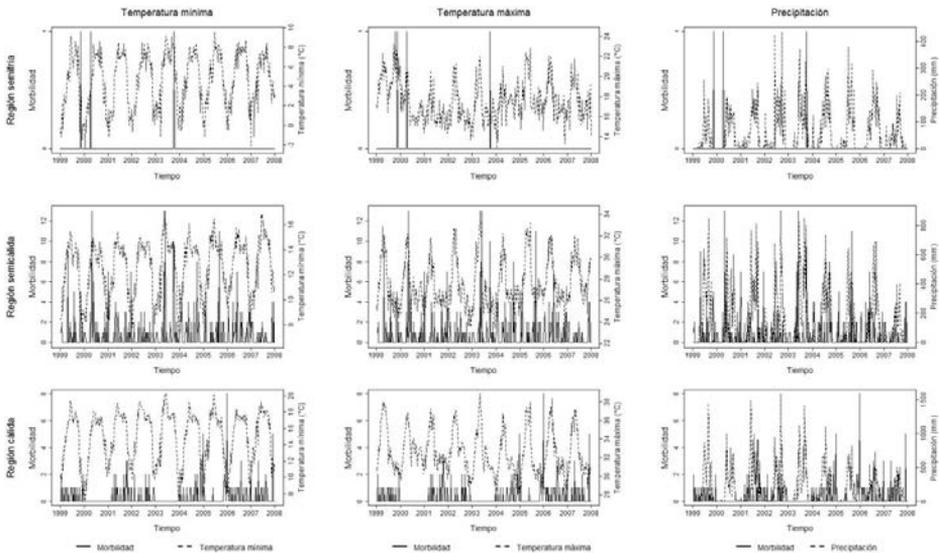


Figura 6.6. Morbilidad por enfermedad de Chagas y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

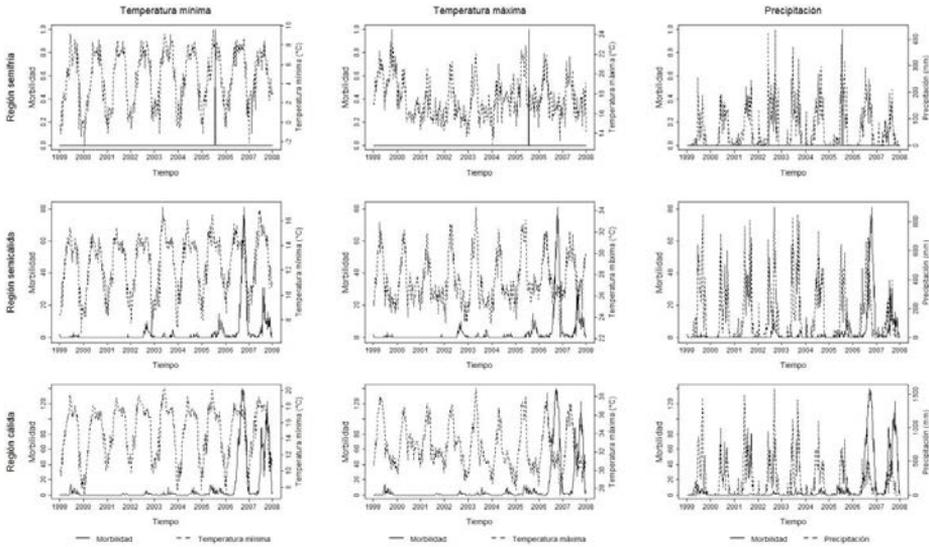


Figura 6.7. Morbilidad por dengue y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 2000 y 2007 en Morelos

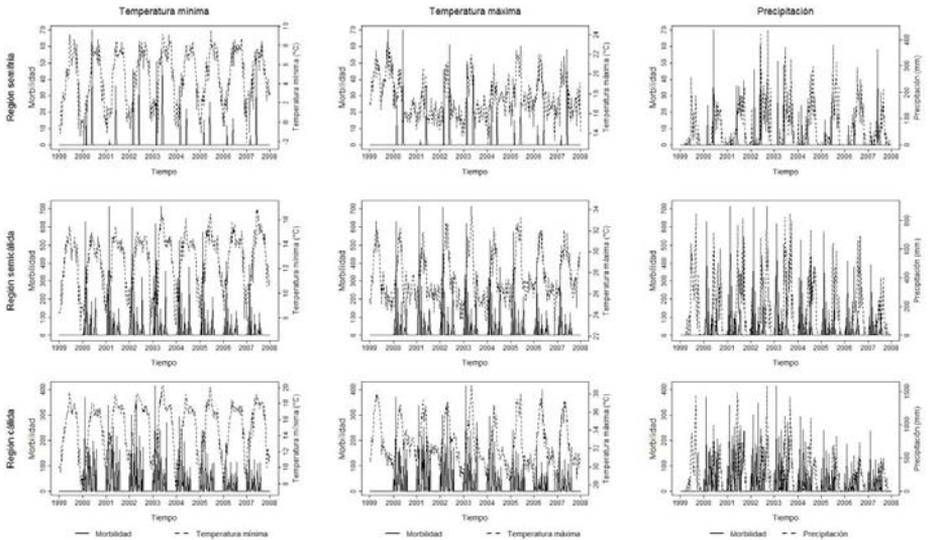


Figura 6.8. Morbilidad por desnutrición y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

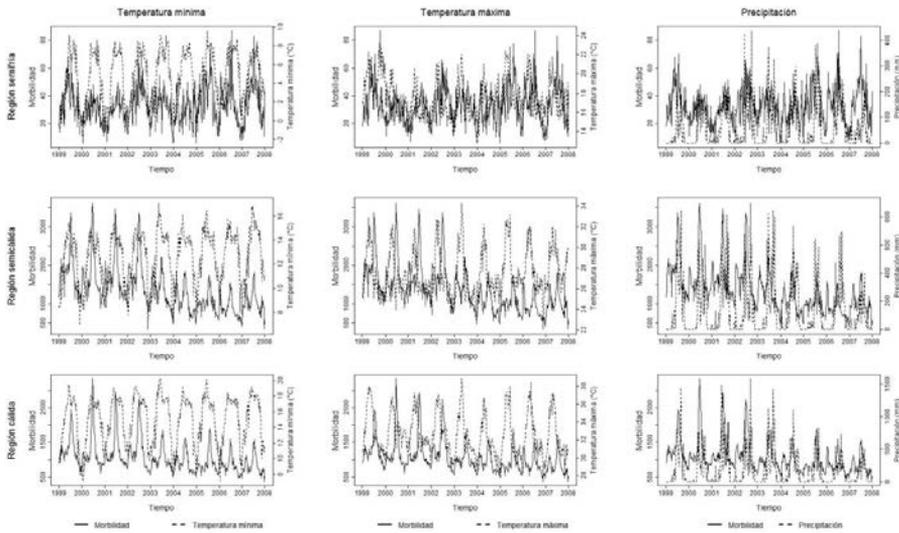


Figura 6.9. Morbilidad por EDA's y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

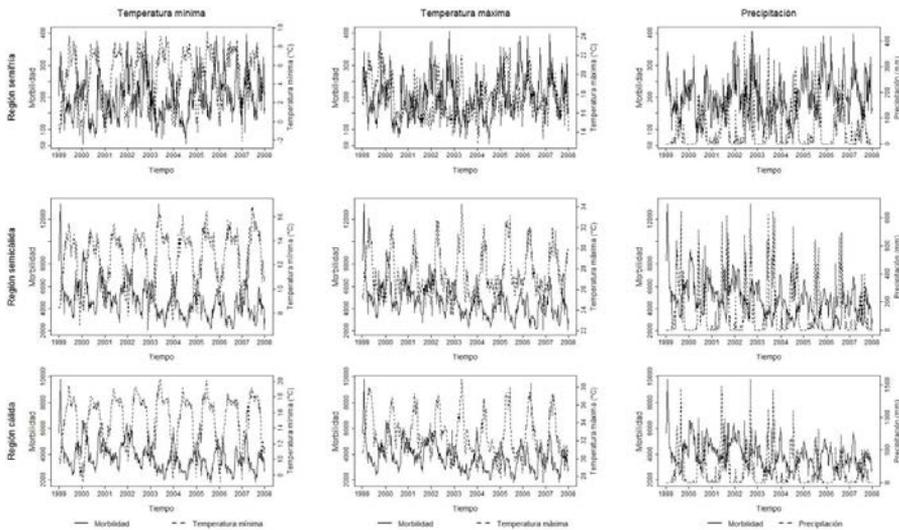


Figura 6.10. Morbilidad por IRA's y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

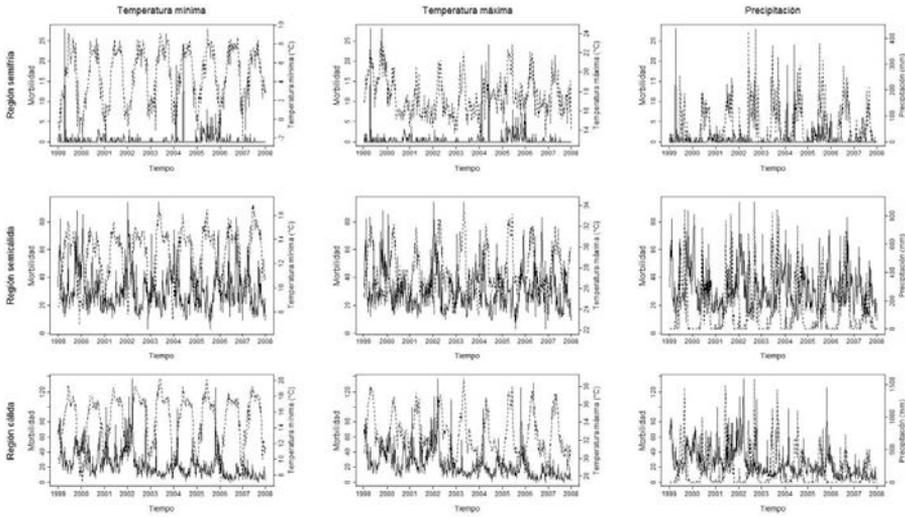


Figura 6.11. Morbilidad por neumonías y bronconeumonías y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

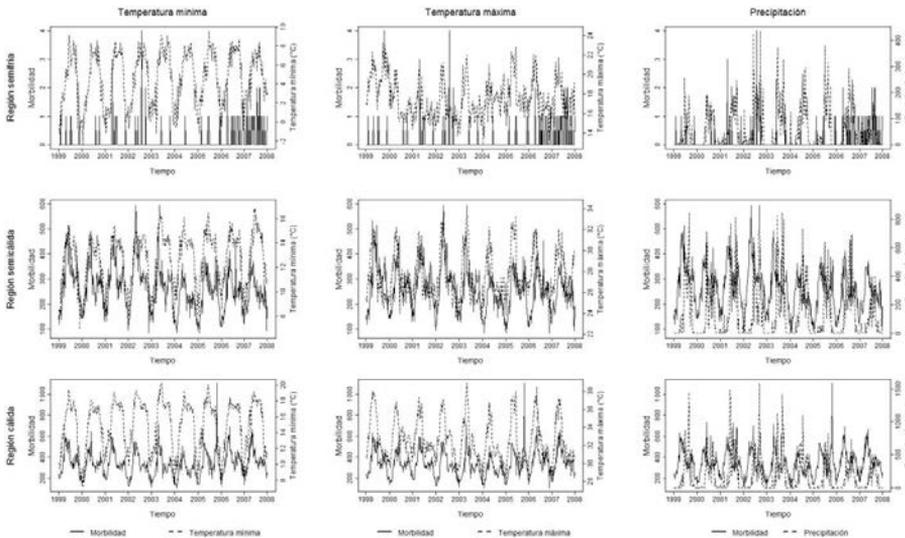


Figura 6.12. Morbilidad por picadura de alacrán y temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación en la región semifría, semicálida y cálida entre 1999 y 2007 en Morelos

Conclusiones y recomendaciones

A partir de la información recopilada y analizada en el presente documento, se puede concluir lo siguiente:

1. Existe poca información sobre la relación entre variables climáticas y enfermedades en México (Chowell *et al.*, 2005; Riojas *et al.*, 2006), y para Morelos no existen estudios de este tipo.
2. Las enfermedades con vulnerabilidad al cambio climático más importantes en Morelos, por su alta tasa de morbilidad, son las infecciones respiratorias agudas (IRA's), la picadura de alacrán y las enfermedades diarreicas agudas (EDA's).
3. En general, las afecciones respiratorias (IRA's, asma, neumonías y bronco neumonías) presentan una correlación negativa con las variables climáticas, es decir, que cuando la temperatura mínima, máxima y la precipitación disminuyen, la incidencia de estas enfermedades aumenta. Por lo tanto, es en los meses de invierno cuando se registra una mayor morbilidad.
4. Las EDA's y picaduras de alacrán están relacionadas positivamente con las variables climáticas, por lo que un aumento en la temperatura mínima, máxima y precipitación, incrementa su morbilidad. Estas condiciones se presentan en los meses de primavera y verano.
5. Aunque entre 1999 y 2006 el dengue se mantuvo controlado en Morelos, en 2007 y 2008 surgió una epidemia, la cual coincidió con la época calurosa y de lluvias.

Debido a lo anterior se formulan las siguientes recomendaciones:

1. Registrar la morbilidad por deshidratación y golpes de calor ya que, al ser enfermedades sensibles al clima, su análisis pudiera resultar en beneficio estado debido a que: a) la región semicálida y cálida presentan temperaturas elevadas durante la primavera y verano; b) la precipitación y, por lo tanto, la mayor humedad relativa coincide con los meses más cálidos, lo cual puede incrementar el riesgo de padecer enfermedades; c) en las regiones cálida y semicálida se practica la zafra (quema de caña de azúcar, la cual posteriormente es recogida por trabajadores durante el día) en las épocas más calurosas del año, pudiéndose incrementar la morbilidad por enfermedades respiratorias (Delgado, 2009; Crowe *et al.*, 2009, 2010).
2. Tener un mejor registro de datos de monitoreo atmosférico en Morelos para que puedan ser analizados y de esta forma complementar el trabajo, especialmente en las zonas de cultivo de caña, ya que al ser quemados aumenta la cantidad de partículas suspendidas en el aire, lo cual puede incrementar las enfermedades respiratorias (Cançado *et al.*, 2006; Rossi *et al.*, 2007; Uriarte *et al.*, 2009; Rossi *et al.*, 2010).

3. Poner especial énfasis a las afecciones respiratorias durante la época invernal y a las EDA's y picaduras de alacrán durante los meses más cálidos.
4. Realizar programas para evitar la aparición de dengue antes de la temporada de calor y lluvias.

Referencias bibliográficas

- Abroug, F., S. ElAtrous, S. Nouria, H. Haguiga, N. Touzi, S. Bouchoucha, (1999). Serotherapy in scorpion envenomation: a randomised controlled trial. *The Lancet* 354: 906-909 pp.
- Al-Asmari, A.K., A.A. Al-Saif. (2004). Scorpion sting syndrome in a general hospital in Saudi Arabia. *Saudi. Med. J.* 25 (1): 64-70 pp.
- Arcos, P. I., Castro R. y Del Busto F. (2002). Desastres y salud pública: un abordaje desde el marco teórico de la epidemiología. *Rev. Esp. Salud Pública.* 76: 121-132 pp.
- Ashford D., Kaiser R., Spiegel R., Perkins B., Weyant R., Bragg S., Plikaytis B., Jarquin C., De Lose Reyes J., y Amador J. (2000). Asymptomatic infection and risk factors for leptospirosis in Nicaragua. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 63(5): 249-254 pp.
- Atun R. A., Samyshkin Y. A., Drobniewski F., Kuznestov S. I., Fedorin I. M. y Coker R. J. (2005). Seasonal variation and hospitalization utilization for tuberculosis in Russia: hospitals as social care institutes. *Eur. J. Public Health.* 15 (4): 350-354 pp.
- Azpuruá J., De La Cruz D., Valderama A. y Windsor D. (2010). *Lutzomyia* Sand Fly Diversity and Rates of Infection by *Wolbachia* and an Exotic *Leishmania* Species on Barro Colorado Island, Panama. *Plos. Negl. Trop. Dis.* 4 (3): e627.
- Ballester F. (2008). El impacto del calor extremo en la salud: nuevos retos para la epidemiología y la salud pública. *Rev. Esp. Salud Pública.* 82 (2): 147-151 pp.
- Balmaseda A., Standish K., Mercado J. C., Matute J. C., Tellez Y., Saborío S., Hammond S. N., Nuñez A., Avilés W., Henn M. R., Holmes E. C., Gordon A., Coloma J., Kuan G. y Harris E. (2010). Trends in patterns of dengue transmission over 4 years in a pediatric cohort study in Nicaragua. *J. Infect. Dis.* 201: 5-14 pp.
- Barrera R., Grillet M. E., Rangel Y., Berti J. y Aché A. (1999). Temporal and spatial patterns of malaria reinfection in Northeastern Venezuela. *American Journal Tropical Medicine Hygiene.* 61(5): 784-790 pp.
- Batscha C. L. (1997). Keeping your clients cool in the summer. *J. Phycosoc. Nurs. Ment. Health. Serv.* 35: 12-17 pp.
- Bawaskar H. S. y Bawaskar P. H. (1989). Stings by red scorpions (*Buthotus famulus*) in Naharashtra State, India: a clinical study. *T. Roy. Soc. Trop. Med. H.* 83 (6): 858-860 pp.
- Bern C., Maguire J. y Alvar J. (2008). Complexities of assessing the disease burden attributable to leishmaniasis. *Plos. Negl. Trop. Dis.* 2(10): e313.
- Betanzos A. F. (2011). La malaria en México: progresos y desafíos hacia su eliminación. *Bol Med Hosp Infant Mex* 68 (2): 159-168 pp.

- Bordas E. y Downs W. G. (1951). Control of *Anopheles pseudopunctipennis* in Mexico with DDT residual sprays applied in buildings. Part IV. Activity pattern of adult *A. pseudopunctipennis*. *Theo. Amer. J. Hyg.* 53 (2): 217-223 pp.
- Bouma M. J. (1996). Epidemiology and control of malaria in northern Pakistan with special reference to Afghan refugees and the El-Nino southern oscillation. Tesis de Doctorado. University of London. Londres, Inglaterra.
- Bryceson D. F. (1989). Nutrition and comodization of food in Sub-Saharan Africa. *Soc. Sci. Med.* 28 (5): 425-440 pp.
- Cançado J., Saldiva P., Pereira L., Lara L., Artaxo P., Martinelli L., Arbex M., Zanobetti A. y Braga A. (2006). The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. *Environ Health Persp* 114(5): 725-729 pp.
- Carcavallo R. (1999). Climatic factors related to Chagas disease transmission. *Mem. Inst. Oswaldo Cruz.* 94: 367-369 pp.
- Ceccato P. (2004). Operational early warning system using SPOT-VGT and TERRA-MODIS to predict Desert Locust outbreaks. En: Proceedings of the 2nd VEGETATION International Users Conference. Antwerpen, Bélgica.
- Celis A., Gaxiola-Robles R., Sevilla-Godínez E., Orozco M.J. y Armas J. (2007). Tendencia de la mortalidad por picaduras de alacrán en México, 1979-2003. *Rev. Panam. Salud Pública.* 21 (6): 373-380 pp.
- Chacón J. M. y Leal M. T. (2006). Impacto socio-económico por las enfermedades hidrotansmisibles en el estado de Morelos, México. pp 1-7. En: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Punta del Este, Uruguay.
- Chain-Castro T. J. y Haro-García L. (1997). Golpe de calor. Informe de siete casos ocurridos en trabajadores agrícolas. *Rev. Med. IMSS.* 35: 347-351 pp.
- Checkley W., Epstein L., Gilman R., Figueroa D., Cama R., Patz J. y Black R. (2000). Effects of El Niño and ambient temperature on hospital admissions for diarrhoeal diseases in Peruvian children. *The Lancet* 355(9202): 442-450 pp.
- Chinchilla M., Castro A., Reyes L., Guerrero O., Calderon-Arguedas O. y Troyo A. (2006). Enfermedad de Chagas en Costa Rica: Estudio comparativo en dos épocas diferentes. *Parasitol. Latinoam.* 61(3-4): 138-145 pp.
- Chowell G., Díaz-Dueñas P., Bustos-Saldaña R., Alemán A. y Fet V. (2006). Epidemiological and clinical characteristics of scorpionism in Colima, Mexico (2000-2001). *Toxicon.* 47 (1): 753-758 pp.
- Chowell G., Hyman J. M., Díaz-Dueñas P. y Hengartner N. W. (2005). Predicting scorpion sting incidence in an endemic region using climatological variables. *Int. J. Environ. Health Res.* 5: 425-435 pp.
- Cisneros M. A., Moles L. P., Gavaladón D., Rojas N. y Torres I. (2002). Serología diagnóstica de leptospirosis porcina en México 1995-2000. *Rev. Cubana Med. Trop.* 54 (1): 28-31 pp.
- Colwell R. (1996). Global climate and infectious disease: the cholera paradigm. *Science.* 274(5295): 2025-2031 pp.

- Crowe J., Moya-Bonilla J. M., Román-Solano B. y Robles Ramírez A. (2010). Heat exposure in sugarcane workers in Costa Rica during the non-harvest season. *Global Health Action* DOI: 10.3402/gha.v3i0.5619.
- Crowe J., van Wendel de Joode B. y Wesseling C.. (2009). A pilot field evaluation on heat stress in sugarcane workers in Costa Rica: What to do next? *Global Health Action* DOI: 10.3402/gha.v2i0.2062.
- Daniels N., MacKinnon L., Bishop R., Altekruse S., Ray B., Hammond R., Thompson S., Wilson S., Bean N. y Griffin P. (2000). *Vibrio parahaemolyticus* infections in the United States, 1973-1998. *J. Infect. Dis.* 181(5): 1661-1666 pp.
- Delgado L., Córdova K. y Rodríguez A. (2004). Epidemiological impact of climatic variation on malaria dynamics in a northeastern region of Venezuela. *Int. J. Infect. Dis.* 8 (1): S23-24 pp.
- Delgado O. (2009). Heat stress assessment among workers in a Nicaraguan sugarcane farm. *Global Health Action* DOI: 10.3402/gha.v2i0.2069.
- Dirección General de Estadística. (1990). Anuario estadístico 1989. Secretaría de Salud. México.
- Dixit S. N., Bushara K. O. y Brooks B. R. (1997). Epidemic heat stroke in a Midwest community: risk factors neurological complications and sequelae. *Wis. Med. J.* 96: 39-41pp.
- Doherty R., Heal M., Wilkinson P., Pattenden S., Vieno M., Armstrong B., Atkinson R., Chalabi Z., Kovats S., Milojevic A. (2009). Current and future climate-and air pollution-mediated impacts on human health. *Environ Health* 8 (1): S8.
- Douglas A. S., Strachan D. P. y Maxwell J. D. (2005). Seasonality of tuberculosis: the reverse of other respiratory diseases in the UK. *Thorax.* 51: 944-946 pp.
- Ebi K. L. (2008). Healthy people 2100: modeling population health impacts of climate change. *Climatic Change.* 88: 5-19 pp.
- Ebi K. L., Sari R., y Menne B. (2006). An approach for assesing human healt vulnerability an public health intervention to adapt to climate change. *Environ. Health. Perspect.* 114 (12): 1930-1934 pp.
- Ebi K. y McGregor G. (2009). Climate change, tropospheric ozone and particulate matter, and health impacts. *Ciênc Saúde Coletiva* 14: 2281-2293 pp.
- Eldwood P. C., Beswick A., O'Brien J. R., Renaud S., Fifield R. y Limb E. S. (1993). Temperature and risk factors for ischaemic heart disease in the Caerphilly porspective study. *Br. Hearth. J.* 70(6): 520-523 pp.
- Epstein P., Diaz H., Elias S., Grabherr G., Graham N., Martens W., Mosley-Thompson E. y Susskind J. (1998). Biological and physical signs of climate change: focus on mosquito-borne diseases. *B. Am. Meteorol. Soc.* 79 (3): 409-417 pp.
- Fleuret A. (1979). The role of wild foliage plants in the diet: a case study from Lushoto, Tanzania. *Ecol. Fd. Nutr.* 8: 87-93 pp.
- Fleury M., Charron D. F., Holt J. D., Brian O., Maarouf A. R. (2006). A time series analysis of the relationship of ambient temperature and common bacterial enteric infections in two Canadian provinces. *Int. J. Biometeorol.* 50: 385-391 pp.

- Foo L., Lim T., Lee H. y Fang R. (1985). Rainfall, abundance of *Aedes aegypti* and dengue infection in Selangor, Malaysia. *Southeast Asian J. Trop. Med. Public Health*. 16(4): 560-568 pp.
- Garrido F., Borges G., Cárdenas V., Bobadilla J. L., Ibarra J. y Ruiz-Matus C. (1990). Mortalidad posneonatal por diarreas: un estudio de casos y controles. *Salud Pública Mex*. 32: 261-268 pp.
- Githeko A. y Ndegwa W. (2001). Predicting malaria epidemics in the Kenyan highlands using climate data: a tool for decision makers. *Global Change & Human Health*. 2(1): 54-63 pp.
- González C., Rebollar-Téllez E.A., Ibáñez-Bernal S., Becker-Fausser I., Martínez-Meyer E., Townsed A. y Sánchez-Cordero V. (2011). Current knowledge of *Leishmaniasis* vectors in Mexico: how geographic distributions of species relate to transmission areas. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 85 (5): 839-846 pp.
- Gordillo M. E., Bugliolo A. G. y Delloni A. (2000). Escorpionismo en pediatría. *Arch. Argent. Pediatr.* 98(5): 296-303 pp.
- Grivetti L. E. (1978). Nutritional success in a semi-arid land: examination of Tswana agro-pastoralists of the Eastern Kalahari, Botswana. *Am. J. Clin. Nutr.* 31: 1204-1220 pp.
- Gubler D. (1998). Dengue and dengue hemorrhagic fever. *Clin. Microbiol. Rev.* 11(3): 480.
- Guerra C. A., Snow R. W. y Hay S. I. (2006). Defining the spatial limits of malaria transmission in 2005. *Adv. Parasitol.* 62: 157-179 pp.
- Guzmán-Tapia, Y., M.J. Ramírez-Sierra, J. Escobedo-Ortegón, E. Dumontiel. (2005). Effect of hurricane Isidore on *Triatoma dimidiata* distribution and Chagas disease transmission risk in the Yucatán peninsula of Mexico. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 73 (6): 1019-1025 pp.
- Harvell C., Kim K., Burkholder J., Colwell R., Epstein P., Grimes D., Hofmann E., Lipp E., Osterhaus A. y Overstreet R. (1999). Emerging marine diseases--climate links and anthropogenic factors. *Science*. 285 (5433): 1505-1510 pp.
- Hashizume M., Armstrong B., Hajat S., Wagatsuma Y., Faruque A., Hayashi T. y Sack D. (2007). Association between climate variability and hospital visits for non-cholera diarrhoea in Bangladesh: effects and vulnerable groups. *Int. J. Epidemiol.* 36 (5): 1030-1037 pp.
- Hernández-Ruiz J. y Becker I. (2006). Linfocitos T citotóxicos CD8+ en la leishmaniasis cutánea. *Salud Publica Mex*. 48: 430-439 pp.
- Hetzel M., Iteba N., Makemba A., Mshana C., Lengeler C., Obrist B., Schulze A., Nathan R., Dillip A. y Alba S. (2007). Understanding and improving access to prompt and effective malaria treatment and care in rural Tanzania: the ACCESS Programme. *Malaria J.* 6(1): 83 p.
- Hsu Y. D., Lee W. H., Chang M. K., Shieh S. D. y Tsao W. L. (1997). Blood lactate threshold and type II fibre predominance in patients with exertional heatstroke. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*. 62: 182-187 pp.

- INEGI. (2010). "Censo General de Población y Vivienda 2010". <http://www.inegi.org.mx/>. Consultado en abril de 2012.
- Instituto Mexicano del Seguro Social. (1989). Anuario Estadístico. Subdirección de Servicios Médicos. México, D.F.
- IPCC. (2007). "Cuarto Informe de Evaluación". <http://www.ipcc.ch>. Consultado en abril de 2012.
- Jusot J. F. y Alto O. (2011). Short term effect of rainfall on suspected malaria episodes at Magria, Niger: a time series study. *T. Roy. Soc. Trop. Med. H.* 105: 637-643 pp.
- Justus J. R. y Fletcher S. R. (2006). *Global Climate Change*.
- Kalinga-Chirwa R., Ngongondo C., Kalanda-Joshua M., Kazembe L., Pemba D. y Kululanga E. (2011). Linking rainfall and irrigation to clinically reported malaria cases in some villages in Chikhwawa District, Malawi. *Phys. Chem. Earth.* 36: 887-894 pp.
- Katsouyanni K., Pantazopoulou A., Touloumi G., Tselepidaki I., Moustris K. y Asimakopulos D. (1993). Evidence of interaction between air pollution and high temperature in the causation of excess mortality. *Arch. Environ. Health.* 48 (4): 235-242 pp.
- Kilbourne E. M. (1992). Illness due to thermal extremes. pp 491-501. En: *Public Health and Preventive Medicine*. East Norwalk, EEUU.
- Koopman J., Prevots D. R., Vaca M. A., Gómez H., Zárate M. L., Longini I. M. y Sepúlveda J. (1991). Determinants and predictors of dengue infection in Mexico. *Am. J. Epidem.* 133 (11): 1168-1178 pp.
- Kovats R. S., Menne B., McMichel A. J., Bertollini R. y Soskoine C. (1999). Early human health effects of climate change and stratospheric ozone depletion in Europe. Background Document. Third Ministerial Conference of Environment and Health. Londres, Inglaterra.
- Kovats, R.S., M.J. Bouma, S. Hajat, E. Worrall, A. Haines. (2003). El Niño and health. *The Lancet.* 362 (9394): 1-9 pp.
- Kumate R. J. (1990). Política nacional del Programa de Control de las Enfermedades Diarréicas. Secretaría de Salud. México.
- Kuno G. y Gubler D. (1995). Factors influencing the transmission of dengue viruses. pp 61-88. En: *Dengue and dengue hemorrhagic fever*. Wallingford, Inglaterra.
- Kunst A. E., Looman G. W. N. y Mackenback J. P. (1993). Outdoor air and temperature and mortality in The Netherlands: a time-series analysis. *Am. J. Epidemiol.* 137: 331-341 pp.
- Lechat M. F. (1979). Disasters and Public Health. *Bull World Health Org.* 57: 11-17 pp.
- Lechat M. F. (1990). The epidemiology of health effects and disasters. *Epidemiol. Rev.* 12: 192-198 pp.
- Lesmana M. y Subekti D. (2001). *Vibrio parahaemolyticus* associated with cholera-like diarrhea among patients in North Yakarta. Indonesia. *Diagn. Micr. Infect. Dis.* 39 (2): 71-75 pp.

- Liao K., Tagaris E., Manomaiphiboon K., Napelenok S., Woo J., He S., Amar P. y Russell A. (2007). Sensitivities of ozone and fine particulate matter formation to emissions under the impact of potential future climate change. *Environ. Sci. Technol.* 41 (24): 8355-8361 pp.
- Linares B., Guizar J. M., Amador N., García A., Miranda V., Pérez J. R. y Chapela R. (2010). Impact of air pollution on pulmonary function and respiratory symptoms in children. Longitudinal repeated-measures study. *BMC Pulm. Med.* 10: 62-71 pp.
- Luna M. A., Moles L. P., Gavaldón D., Nava C. y Salazar F. (2005). Estudio retrospectivo de seroprevalencia de leptospirosis bovina en México considerando las regiones ecológicas. *Rev. Cubana Med. Trop.* 57(1): 28-31 pp.
- Martens W. J. (1998). Health impacts of climate change and ozone depletion: an ecoepidemiologic modeling approach. *Environ. Health. Perspect.* 106 (1): 241-251 pp.
- Martínez B. F., Annett J. L., Kilbourne E. M., Kirk M. L., Lui K. J. y Smith S.M. (1989). Geographic distribution of heat-related deaths among elderly persons. Use of county-level dot maps for injury surveillance and epidemiological research. *JAMA.* 262: 2246-2250 pp.
- Mastrangelo G., Fedeli U., Visentin C., Milan G., Fadda E. y Spolaore P. (2007). Pattern and determinants of hospitalization during heat waves: an ecologic study. *BMC Public Health.* 7: 1-8 pp.
- Medina-Ramon M., Zanobetti A. y Schwartz J. (2006). The effect of ozone and PM₁₀ on hospital admissions for pneumonia and chronic obstructive pulmonary disease: a national multicity study. *Am. J. Epidemiol.* 163(6): 579-588 pp.
- Mena N., Troyo A., Bonilla-Carrión R. y Calderón-Arguedas Ó. (2011). Factores asociados con la incidencia de dengue en Costa Rica. *Rev. Panam. Salud Pública.* 29 (4): 234-242 pp.
- Monroy C., Bustamante D., Rodas A., Enriquez M. y Rosales R. (2003). Habitats, dispersion and invasion of sylvatic *Triatoma dimidiata* (Hemiptera: Reduviidae: Triatominae) in Peten, Guatemala. *J. Med. Entomol.* 40(6): 800-806 pp.
- Moolgavkar S., Luebeck E. y Anderson E. (1997). Air pollution and hospital admissions for respiratory causes in Minneapolis-St. Paul and Birmingham. *Epidemiology.* 8(4): 364-370 pp.
- Moore K., Neugebauer R., Lurmann F., Hall J., Brajer V., Alcorn S. y Tager I. (2008). Ambient ozone concentrations cause increased hospitalizations for asthma in children: an 18-year study in Southern California. *Environ. Health Persp.* 116(8): 1063-1070 pp.
- Nagayama N. y Ohmori M. (2006). Seasonality in various forms of tuberculosis. *International Journal Tuberculosis and Lung Disease.* 10 (10): 1117-1122 pp.
- Navarrete-Espinosa J., Acevedo-Vales J. A., Huerta-Hernández E., Torres-Barranca J. y Gavaldón-Rosas D. G. (2006). Prevalencia de anticuerpos contra dengue y

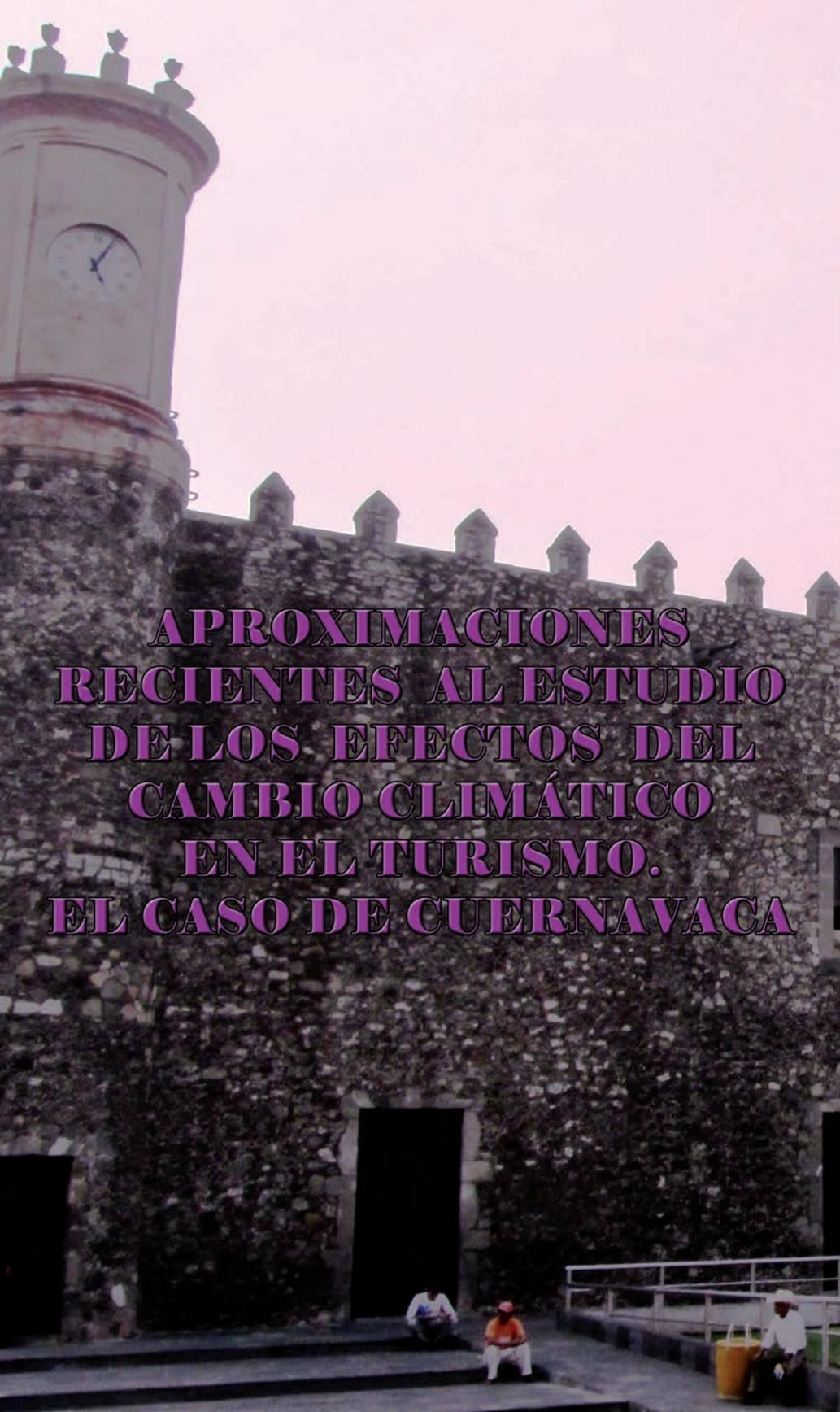
- leptospira en la población de Jaltipán, Veracruz. *Salud Pública de Mex.* 48 (3): 220-228 pp.
- Nogueira P., Falcao J., Contreiras M., Paixão E., Brandão J. y Batista I. (2005). Mortality in Portugal associated with the heat wave of August 2003: early estimation of effect, using a rapid method. *Euro Surveill.* 10 (7): 50-53 pp.
- O'Neil, M. S., Loomis D. y Borja-Aburto V. H. (2004). Ozone, area social conditions, and mortality in Mexico City. *Environ. Res.* 94: 234-242 pp.
- Olaiz-Fernández G., Rivera-Dommarco J., Shamah-Levy T., Rojas R., Villalpando-Hernández S., Hernández-Avila M. y Sepúlveda-Amor J. (2006). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2006. Instituto Nacional de Salud Pública. Cuernavaca, México.
- OMS. (1994). Press release. WHO/8.
- OMS. (2006). Informal consultation on malaria: setting up the WHO agenda. Who global malaria Program. Geneva: World Health Organization.
- OMS. (2008). Cambio climático y salud humana-Riesgos y respuestas. Ginebra, Suiza.
- OMS. (2008b). World malaria report 2008. WHO/HTM/GMP/2008.1. Ginebra, Suiza.
- OMS. G.C.E. (2002). Control of Chagas Disease. Buenos Aires, Argentina.
- Patz J. y Olson S. (2006). Malaria risk and temperature: influences from global climate change and local land use practices. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 103 (15): 5635-5636 pp.
- Patz J., Epstein P., Burke T. y Balbus J. (1996). Global climate change and emerging infectious diseases. *Jama.* 275 (3): 217-223 pp.
- Patz J., Strzepek K., Lele S., Hedden M., Greene S., Noden B., Hay S., Kalkstein L., Beier J. (1998). Predicting key malaria transmission factors, biting and entomological inoculation rates, using modelled soil moisture in Kenya. *Trop. Med. Int. Health.* 3 (10): 818-827 pp.
- Patz J., Vavrus S., Uejio C. y McLellan S. (2008). Climate change and waterborne disease risk in the Great Lakes region of the US. *Am. J. Prev. Med.* 35(5): 451-458 pp.
- Petersdorf R. G. (1994). Hypothermia and hyperthermia. pp 2473-3479. En: *Harrison's Principles of Internal Medicine.* Isselbacher, K.J., E. Braunwald, J.D. Wilson, J.B. Martin, J.B. Fauci, D.L.Kasper. McGraw-Hill. Nueva York, EEUU. 2118 pp.
- Polis G. A. (1980). Seasonal patterns and age-specific variation in the surface activity of a population of desert scorpions in relation to environmental factors. *J. Anim. Ecol.* 49 (1): 1-18 pp.
- Poveda G., Jaramillo A., Gil M., Quiceno N. y Mantilla R. (2001a). Seasonality in ENSO-related precipitation, river discharges, soil moisture, and vegetation index in Colombia. *Water Resour. Res.* 37 (8): 2169-2178 pp.
- Poveda G., Rojas W., Quiñones M., Vélez I., Mantilla R., Ruiz D., Zuluaga J. y Rua G. (2001b). Coupling between annual and ENSO timescales in the malaria-climate association in Colombia. *Environ. Health Persp.* 109(5): 489-493 pp.

- R Development Core Team. (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Ramírez E., Robles E., Sainz M. G., Ayala R. y Campoy E. (2009). Calidad microbiológica del acuífero de Zacatepec, Morelos, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 25(4): 247-255 pp.
- Ramlow J. M., Kuller L. H. (1990). Effects of the summer heatwave of 1988 on daily mortality in Allegheny County, PA. *Public Health Rep*. 105 (3): 283-289 pp.
- Ramos C. (2010). La fiebre por dengue en México: un problema creciente de salud pública. *Salud Pública Mex*. 37 (1): 12-20 pp.
- Ramsey J. M., Alvear A. L., Ordoñez R., Muñoz G., García A., López R. y Leyva R. (2005). Risk factors associate with house infestation by the Chagas disease vector *Trinotoma pallidipennis* in Cuernavaca metropolitan area, Mexico. *Med. Vet. Entomol*. 19 (2): 219-228 pp.
- Ramsey J. M., Ordoñez R., Tello A., Pohls J. L., Sánchez V. y Peterson A. T. (2003). Actualidades sobre la epidemiología de la enfermedad de Chagas en México. pp 85-103. En: *Iniciativa para la Vigilancia y el Control de la Enfermedad de Chagas en la República Mexicana*. Instituto Nacional de Salud Pública. 214 pp.
- Rangel H., Gatica R. y Ramos C. (1998). Detection of antibodies against *Trypanosoma cruzi* in donors from a blood bank in Cuernavaca, Morelos, Mexico. *Arch. Med. Res*. 29: 79-82 pp.
- Reiter, P. (1999). Weather, vector biology, and arboviral recrudescence. pp 245-255. En: *Arboviruses: epidemiology and ecology*. Monath, T.P. Editor. CRC Press. Boca Raton, EEUU.
- Riojas H., Hurtado M., Idrovo J., y Vázquez H. (2006). Estudio diagnóstico sobre los efectos del cambio climático en la salud humana de la población en México. Instituto Nacional de Ecología. Instituto Nacional de Salud Pública. México, D.F. 36 pp.
- Robine J. M., Cheung S. L., Le Roy S., Van Oyen H. y Herrmann F. R. (2007). Report on excess mortality in Europe during summer 2003. 2003 Heat Wave Project.
- Robinson P. (2001). On the definition of a heat wave. *Journal of Applied Meteorology*. 40: 762-775 pp.
- Robles-Valderrama E., Ramírez-Flores E., Ayala-Patiño R., Durán-Díaz A., Sáinz-Morales M. G., Martínez M. E., Martínez B. y González-Arreaga M. E. (2010). Calidad del agua de tres pozos de la zona centro del acuífero Cuautla-Yautepec, Morelos, México. *Biocyt*. 3(11): 159-175 pp.
- Robles-Valderrama E., Ramírez-Flores E., Durán-Díaz A., Ayala-Patiño R., Sáinz-Morales M. G. y González-Arreaga M. E. (2009). Estudio fisicoquímico y bacteriológico de la calidad del agua en pozos del acuífero de Cuernavaca, Morelos. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 5(2): 114-122 pp.

- Romieu I., Meneses F., Ruíz S., Sienna J. J., Huerta J., White M. C., Etzel R. A. (1996). Effects of air pollution on the respiratory health of asthmatic children living in Mexico City. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 154 (2): 300-307 pp.
- Rossi F. L., Palucci M. H. y Hong O. (2010). Work and health conditions of sugar cane workers in Brazil. *Rev. Esc. Enferm. USP.* 44(4): 974-979 pp.
- Rossi F., Palucci M. H. y Cruz M. L. C. (2007). La pobreza como factor determinante del adolecer de trabajadores del corte de la caña de azúcar. *Rev. Latino-am. Enfermagem.* 15: 735-741 pp.
- Salud en las Americas. 2007. <http://www1.paho.org/hia/home.html>.
- Santos, C.F., N. Alves, L. Freire-Maia. (1993). Acute pulmonary edema after *Tityus serrulatus* scorpion sting in children. *Am. J. Cardiol.* 71 (2): 243-245 pp.
- Schwartz J. (1994). Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, Alabama. *Am. J. Epidemiol.* 139(6): 589-598 pp.
- Schwartz J., Levin R. y Hodge K. (1997). Drinking water turbidity and pediatric hospital use for gastrointestinal illness in Philadelphia. *Epidemiology.* 8(6): 615-620 pp.
- Secretaría de Salud. (2002). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2003). Boletín de Epidemiología. Sem 53. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2004). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2005). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2008). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2009). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Secretaría de Salud. (2010). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Sepúlveda A., Santiago J. y Preciado F. J. (2002). La rata y el perro, importantes vectores de la leptospirosis en explotaciones pecuarias de Cd. Guzmán, Jalisco. *Rev. Cubana Med. Trop.* 54 (1): 21-23 pp.
- Sheuren J. M., Le Polain O., Below R., Guha-Sapir D. y Ponserrre S.. (2008). Annual disaster statistical review. The numbers and trends 2007. United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Université Catholique de Louvain. Melin, Bélgica. 47 pp.
- Sistema Único de Información para la Vigilancia Epidemiológica. (2006). En: Sistema Único Automatizado de Vigilancia Epidemiológica.
- Sistema Único de Vigilancia Epidemiológica. (2010). En: Sistema Único Automatizado de Vigilancia Epidemiológica.

- Socolovschi C., Angelakis E., Renvoisé A., Fournier P. E., Marié J. L., Davoust B., Stein A. y Raoult D. (2011). Strikes, flooding, rats and leptospirosis in Marseille, France. *Int. J. Infect. Dis.* 15: 710-715 pp.
- SSA Secretaría de Salud. (2006). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- SSA Secretaría de Salud. (2007). Boletín de Epidemiología. Sem 52. México, DF. Dirección General de Epidemiología. SSA.
- Tangkanakul W., Tharmaphornpilas P., Datapon D. y Sutantayawalee S. (2000). Food poisoning outbreak from contaminated fish-balls. *J. Med. Assoc.Thai.* 83(11): 1289-1295 pp.
- Tanser F., Sharp B. y Le Sueur D. (2003). Potential effect of climate change on malaria transmission in Africa. *The Lancet.* 362 (9398): 1792-1798 pp.
- Téllez M. M., Romieu I., Polo M., Ruiz S., Meneses F., Hernández M. (1997). Efecto de la contaminación ambiental sobre las consultas por infecciones respiratorias en niños de la ciudad de México. *Salud Pública Mex.* 39 (6): 513-522 pp.
- Terrés A. M. y Casas L. T. (2002). Enfermedad diarreica e intolerancia a la lactosa en México. *Rev. Med. IMSS.* 4: 329-341 pp.
- Thomson M., Ericksen P., Ben M. y Connor S. J. (2004). Land-use change and infectious disease in West Africa. pp 169-187. En: *Ecosystems and Land Use Change.* DeFries R, Asner G, Houghton R, Editores. Geophysical Monograph. American Geophysical Union. Washington, DC, EEUU.
- Uriarte M., Yackulic C.B., Cooper T., Flynn D., Cortes M., Crk T., Cullman G., McGinty M. y Sircely J. (2009). Expansion of sugarcane production in Sao Paulo, Brazil: Implications for fire occurrence and respiratory health. *Agric. Ecos. Environ.* 132: 48-56 pp.
- Vargas L., Casis G. y Earle W.C. (1941). *Anopheles pseudopunctipennis*, Theobald, a vector of malaria in Mexico. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 21: 779-788 pp.
- Velasco-Castrejón O., Guzmán-Bracho C., Rivas-Sánchez B., Aguilar-Torrentera F. y Hernández-Márquez G. (2004). La Leishmaniasis con especial referencia a México. 2a. ed. Colección de Cuadernos Técnicos, INDRE, SSA. México, D.F.
- Vellings P. W. y Van Verseveld. (2000). Cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos. Informe del Instituto de Estudios Ambientales de la Universidad de Vrije (Amsterdam). Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF). Londres, Inglaterra.
- Vijayachari P., Sugunan A. y Shriram A. (2008). Leptospirosis: an emerging global public health problem. *J. Biosci.* 33(4): 557-569 pp.
- Villegas-Trejo A., Che-Mendoza A., González-Fernández M., Guillermo-May G., González-Bejarano H., Dzul-Manzanilla F., Ulloa-García A., Danis-Lozano R. y Manrique-Saide P. (2011). Control enfocado a *Aedes aegypti* en localidades de alto riesgo de transmisión de dengue en Morelos, México. *Salud Pública de Mex.* 53 (2): 141-151 pp.

- Watts D., Burke D., Harrison B., Whitmire R. y Nisalak A. (1987). Effect of temperature on the vector efficiency of *Aedes aegypti* for dengue 2 virus. *Am. J. Trop. Med. Hyg.* 36 (1): 143 p.
- Zacarías P. y Majlender P. (2011). Comparison of infant malaria incidence in districts of Maputo province, Mozambique. *Malaria J.* 10: 93 p.
- Zhou G., Minakawa N., Githeko A. y Yan G. (2004). Association between climate variability and malaria epidemics in the East African highlands. *P. Natl. Acad. Sci. USA.* 101(8): 2375-2380 pp.



**APROXIMACIONES
RECIENTES AL ESTUDIO
DE LOS EFECTOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO
EN EL TURISMO.
EL CASO DE CUERNAVACA**

**7
CAPÍTULO**

CAPÍTULO 7

APROXIMACIONES RECIENTES AL ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL TURISMO. EL CASO DE CUERNAVACA

Rafael Monroy-Ortiz^{16*}
Jacinto Mariscotti Rodríguez Santana^{16*}
Rafael Monroy^{17**}

Los sistemas urbanos proveen un entorno de confort útil en términos económicos, porque ofrecen condiciones materiales para la reproducción de los circuitos globales de producción y consumo. Estos son centrales para generar ventajas funcionales a las condiciones de vida a la población provistas por las economías de escala, porque aportan servicios e infraestructura para una proporción mayor de personas, además, resultan importantes para llevar a cabo los mayores avances científicos y tecnológicos indispensables para la sociedad.

Las ventajas económicas de los espacios urbanos son un factor permanente para su aprovechamiento político administrativo. Los patrones regionales de estructuración económica son integrados en los programas de gobierno o a los planes territoriales determinados para el uso y aprovechamiento de las condiciones económicas y ecológicas locales. En consecuencia, el criterio predominante para mantener las ventajas económicas de la ciudad por encima de sus recursos naturales, incluye de manera central volverla competitiva e insertarla en los procesos de globalización (Banco Mundial, 2001).

Los patrones de inserción a la globalización tienen que ver con un funcionamiento en el circuito global de producción. Se reconoce por ejemplo, que dicha inserción está condicionada por la posibilidad de la desregulación, la autorregulación de las corporaciones internacionales, las privatizaciones y el libre mercado (Kozac, 2011), todo lo cual viene a consolidar una serie de ventajas de orden exclusivamente económico y en el que los sistemas urbanos cumplen un papel central.

La discusión de criterios regionales de desarrollo coadyuva a sostener condiciones holísticas para el aprovechamiento regional de los recursos naturales independientemente del patrón de los países en la producción. El efecto directo de priorizar la estructuración económica regional, lleva a la consolidación de patrones territoriales de aglomeración; asegurando la localización óptima de emplazamientos, como el mercado de consumo y de trabajo. El caso mexicano, indica que la población urbana se ha incrementado en tres cuartas partes del total nacional, concentrándose en

^{16*}Facultad de Arquitectura. Universidad Autónoma del Estado de Morelos

^{17**}Centro de Investigaciones Biológicas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos

56 zonas metropolitanas (Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población, INEGI, 2007).

La competitividad urbana se refiere al desempeño económico, en términos de especialización y eficiencia para la instalación, funcionamiento del mercado y mejoramiento de la calidad de vida de la población (Sobrino, 2002). Las economías de escala, consolidación y accesibilidad de las vías de comunicación, la especialización en los procesos productivos o la posibilidad de producir bienes y servicios para un mercado regional son factores de desempeño económico (Krugman, 2008).

La política económica está condicionada por la capacidad de hacer competitivos a los sistemas urbanos (Secretaría de Desarrollo Social, 2001) así las ventajas físico bióticas del territorio se fortalecen con base en criterios de localización y funcionamiento económico unidimensional que cumple el objetivo de integrarse a los mercados globales o cubrir el funcionamiento en dicho proceso (Sassen, 2006), en términos de la apertura a la inversión extranjera directa, la desregulación económica o el libre flujo de capitales (Comisión Económica Para América Latina, 2004). Por tanto, la ciudad competitiva es aquella en donde se flexibilizan las particularidades espaciales relacionadas con la salud ecológica y la reproducción social.

La determinación unidimensional de la política económica territorial da lugar a desequilibrios, entre los que destacan la disparidad social (Pradilla, 2009), la falta de desarrollo humano o el deterioro ambiental (Martínez-Alier, 2001). Las variables ambientales son consideradas marginalmente a pesar de cumplir un papel central en la provisión y el mantenimiento de la racionalidad económica. En todo caso y forzando una discusión en el marco de la competitividad, estas podrían ser consideradas como factores estáticos.

En este sentido, la competitividad tiene como objeto la integración a un proceso extra regional con base en la homogeneización de las particularidades regionales, el impacto directo de su deterioro ambiental que desequilibran la actividad económica. Por ejemplo, el cambio climático global vulneran las actividades económicas predominantes.

En este trabajo se analiza la importancia de la conservación de los procesos ecosistémicos para el aprovechamiento económico del turismo en Morelos, considerando a dicho sector como una vertiente que hace competitiva económicamente a la región. El propósito es estimar las modificaciones del promedio estado del tiempo como una aproximación a los efectos locales del cambio climático global y sus impactos sobre la actividad turística.

El turismo en la producción económica regional

La Organización Mundial del Turismo (OMT) define al turismo como las actividades que realizan las personas durante sus viajes y estancias en lugares distintos a su entorno habitual. Ello suele suceder por un período consecutivo inferior a un año, con fines de ocio, por negocios y otros motivos no relacionados con el ejercicio de una actividad remunerada en el lugar visitado (Organización de las Naciones Unidas, Organización Mundial del Turismo, 2001). En todo caso, tales actividades están asociadas a condiciones ecológicas o su aprovechamiento y a los bienes y servicios que ofrecen como parte del atractivo turístico.

En el país existen 3,005,157 unidades económicas del sector privado y paraestatal (INEGI, 2009); el universo turístico se compone de 278,439 unidades económicas, de las cuales el 15.3% interviene directamente en el sector, es decir, alrededor de 42,612; no obstante, el 84.7% restante (235,827 unidades) participa en actividades conexas al turismo (INEGI, 2009).

De acuerdo con las cifras del INEGI, la industria turística representa el 5.7% de la producción bruta total del país; dicho resultado es superior al registrado por los sectores de electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final (5.3%); información en medios masivos (4.5%); industrias manufactureras (5.5%) y construcción que en el año de referencia registró una participación de 2.8%, respectivamente (INEGI, 2009). En tal proporción, destaca el turismo en la configuración regional del país. Considerando el indicador del producto interno bruto, la participación del sector turístico es de 7.8% para el 2011. Considerando el valor agregado censal bruto nacional, las actividades específicas de turismo registran una aportación de 183 millones de pesos; como se comenta antes, la proporción corresponde a 5.7%, mismo que está por arriba de los sectores de electricidad, agua y suministro de gas e información en medios masivos, estimados en 5.3 y 5.2%, respectivamente (INEGI, 2009).

En cuanto al consumo intermedio; es decir, el importe de los bienes y servicios consumidos por las unidades económicas para el desarrollo de sus actividades, la participación del turismo alcanzó el 5.7%, respecto al total nacional y equivalente a 175 millones de pesos. También se comprueba que ésta cifra es superior a lo obtenido por los sectores de electricidad, agua y suministro de gas por ductos al consumidor final, industrias manufactureras e información en medios masivos, los cuales aportan 5.6%, 4.2% y 3.7%, respectivamente (INEGI, 2009).

Derivado de la revisión del valor agregado censal bruto y del consumo intermedio, es posible identificar ciertas condiciones regionales de las políticas regionales, en términos de la inversión por estado. En otras palabras, pueden correlacionarse la eficiencia económica del sector por estado con las estrategias de consolidación, observadas en la

inversión propuesta por la federación para los sectores y las entidades que más capacidad productiva demuestran. En este sentido, con excepción de Morelos todos los estados que son el objeto final de la inversión resultan destinos de playa como se observa en la figura 7.1.

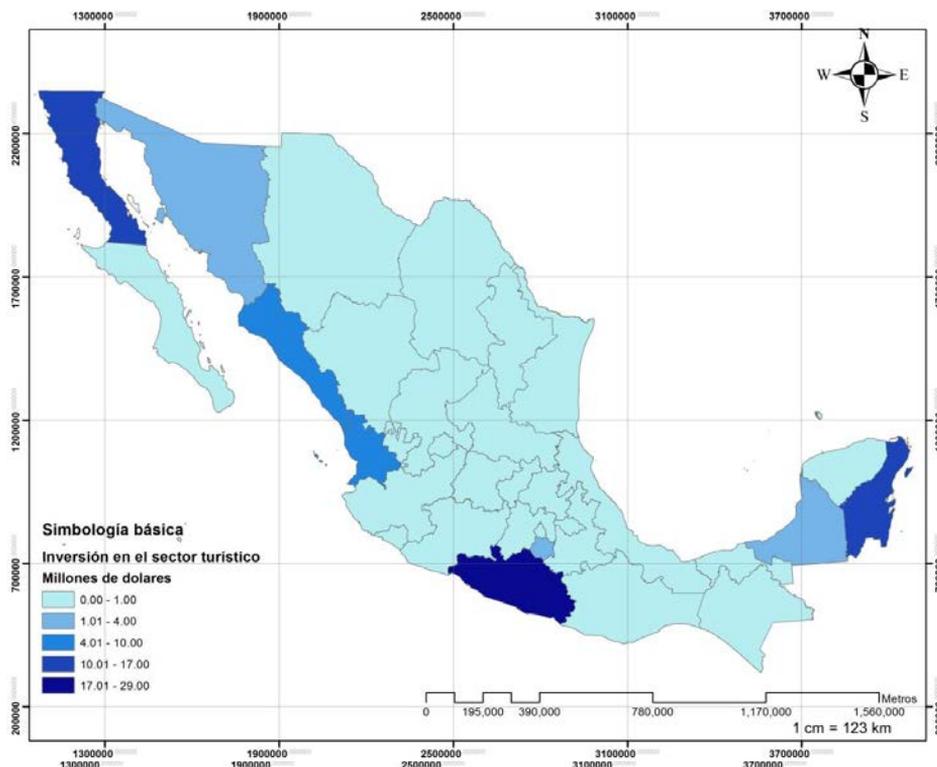


Figura 7.1. Inversión en el sector turístico por estado (millones de dólares). Fuente: elaboración propia basada en Secretaría de Turismo, 2005.

Ahora bien, Morelos también tiene una de las mayores participaciones de sus unidades económicas en el sector turístico regionalmente (18.1%), incluso por arriba del Estado de México y Querétaro que registran 12.3 y 10.7% respectivamente. Además de que la Región de Conurbación del País tiene en promedio una participación de 9.18%, Morelos de igual manera reporta el porcentaje más elevado en cuanto a personal ocupado y remuneraciones con 21.3% y 17.4% respectivamente, seguido en el mismo orden por México con 11.2% y 7.2%. Sin embargo, el Distrito Federal ocupa el segundo sitio en remuneraciones con 8.9%.

En este sentido, la revisión de la proporción de las remuneraciones respecto al país demuestra consistentemente el papel relevante de la entidad, sin ser un destino de playa y sin contar con la misma cantidad de inversión del sector público para su desarrollo; en todo caso, esta debiera ser una transformación de la entidad para reinvertir en la conservación del patrimonio natural y cultural que aprovecha de manera general. Por tanto, Morelos registra una de las principales aportaciones del país, como se observa en la figura 7.2.

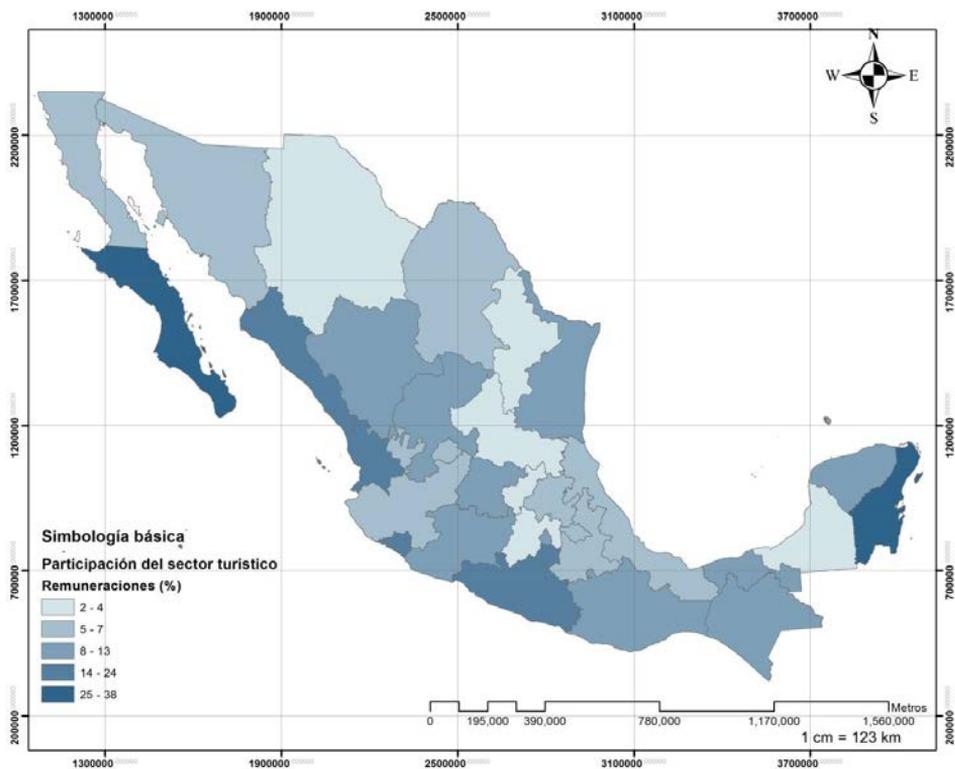


Figura 7.2. Participación del sector turístico, remuneración (%). Fuente: elaboración propia basada en Secretaría de Turismo (2004).

Si bien, la producción bruta del Distrito Federal es la mayor regionalmente en números absolutos, en términos relativos se observa que la participación del sector turístico en la producción es mayor en Morelos, la cual equivale a 8.6 % del total nacional, seguido por el Distrito Federal con 8.1%, Tlaxcala con 3.8%, Puebla y Querétaro con 3.5%, e Hidalgo con 3.4%.

Acorde a la participación en valor agregado censal bruto, Morelos registra el 9%, el Distrito Federal contabiliza 5.7%, mientras que con 5.6% están Hidalgo, Querétaro y Tlaxcala; Puebla con 4.8% y 2.0% para el Estado de México. Cabe destacar que la entidad se encuentra dentro de las diez entidades que mayor porcentaje de participación turística en el valor censal bruto reportan.

Se aprecia que la entidad local destaca entre estados de clara vocación en infraestructura turística; dado que, de la participación porcentual del turismo en el valor agregado censal bruto por entidad, se distinguen las siguientes posiciones; Quintana Roo 48.3, Baja California Sur 30.2, Nayarit 16.6, Guerrero 16.1, Colima 14.5, Sinaloa 12.7, Baja California 9, Morelos 9, Veracruz 8.4, Tamaulipas 8.4 % (INEGI, 2009).

El margen normativo de la competitividad

El sector turístico es central para la estructura económica nacional; en la práctica, las políticas regionales para ajustar el territorio a condiciones más rentables prevalecen, incluyendo aquellas con énfasis en dicho sector. En general, el Programa Nacional de Ordenamiento del Territorio y Desarrollo Urbano plantea la búsqueda de un *“desarrollo endógeno que reconcilie objetivos de eficiencia económica, cohesión social y equilibrio ecológico”*, además propone *“la activación de las potencialidades de cada región, reducir las desigualdades y el incremento de la competitividad”*. Incluso las estrategias políticas reconocen la necesidad de *“la ordenación del Territorio que permite maximizar la eficiencia económica del territorio garantizando, al mismo tiempo, su cohesión social, política y cultural en condiciones de sustentabilidad”*. En la práctica, se valida el criterio de la competitividad para la estructuración del territorio.

El Programa Nacional de Desarrollo (PND) considera al sector turístico como una actividad muy productiva y con un empleo bien remunerado, aunque presenta desequilibrios que se aprecian en el territorio, ocasionados por las condiciones históricas y culturales del país. Incluso, el turismo ha sido considerado un eje de desarrollo, donde la demanda es un factor central para consolidar la oferta nacional.

Sin embargo, y dadas las condiciones de la globalización, existen otros mercados que ofertan el sector turístico donde entran en competencia no solamente las ventajas competitivas de localización sino también las ventajas comparativas que hacen del mercado interno una buena opción para mantener las actividades del ramo. Por lo tanto, las políticas debieran enfocarse al consumo interno.

Otro aspecto importante resulta en que la oferta turística se basa en las particularidades ambientales que tienen que ver con los aspectos climáticos, entornos naturales, paisajes, flor y fauna, históricos, culturales, y sociales tanto tangible como intangibles. En este sentido habrá que enfocar esfuerzos para conservar la biodiversidad, las condiciones

tanto climáticas como las principales características de los ecosistemas; se menciona que *“tanto las inversiones como la infraestructura deben estar enfocadas a la población y de esta manera consolidar el bienestar de la población”* dentro de una visión integradora del desarrollo (PND, 2007).

De igual manera se plantea hacer del país un líder en el sector turismo con una diversificación de productos y destinos, además de fomentar la competitividad y que se brinde un servicio de calidad mundial. Para posicionar al país es necesario captar un 35% más de visitantes. Para alcanzar tal objetivo se propusieron seis estrategias, a saber:

1. Abordar la certeza jurídica para los inversionistas en los destinos turísticos y consolidar las inversiones existentes; propone ampliar la gama de servicios donde se incluye a la naturaleza, el turismo rural, de aventura y la cooperación de los diferentes ámbitos de gobierno. Otorgar apoyo a zonas rurales e indígenas.
2. Mejorar la competitividad que garantice un desarrollo sustentable y un ordenamiento territorial integral, en un marco de sustentabilidad económica y social y coordinación con el sector privado.
3. Desarrollar programas en materia de seguridad turística, de promoción de mercados, de aumentar la rentabilidad, así como, asistencia e información al turista.
4. Fortalecer el marco normativo que promueva el Poder legislativo a comunidades y empresas, además de crear un marco legal para el desarrollo sustentable.
5. Promover acciones de desarrollo y apoyo a la comercialización de productos competitivos para los diferentes segmentos de los mercados actuales y potenciales, nacionales y extranjeros. Se diseñarán programas de mercadotecnia, crear nuevos productos de calidad, accesibles y competitivos para nuevos nichos del mercado.
6. Asegurar un desarrollo turístico integral. Aprovechar todo el potencial de crecimiento. Que el sector sea incluyente en lo referente a las condiciones de vida de las poblaciones locales donde se ubique la actividad (PND, 2007)“.

En todo caso, la transformación competitiva se integra con criterios contrastantes funcionalmente, para el caso del turismo, dado que este sector es particularmente dependiente de estrategias de conservación diferencial, condicionada por el aprovechamiento directo del ambiente.

Aprovechamiento ambiental del turismo

En Morelos, la vocación turística se demuestra en la participación de la producción bruta del sector. La hipótesis del aprovechamiento ambiental para el desarrollo de tal actividad está condicionada por la disposición de particularidades ambientales, dada la falta de un factor como la playa. En este sentido, el Centro de Estudios Superiores de

Turismo (CESTUR) de la Secretaría de Turismo (SECTUR), reporta dos períodos vacacionales anuales de relevancia para el sector en el estado. El primero se identifica en la “temporada vacacional de Semana Santa” entre los meses de marzo y abril. El documento “Hábitos de Consumo del Turista Nacional” describe algunas características del turismo a la entidad, por ejemplo, el 49% del mercado turístico realizó el viaje en familia, 34% con familia extendida y solo el 17% con amigos (SECTUR, Centro Estudios Superiores de Turismo, 2005). Al mismo tiempo, el promedio de vacacionistas por visita se estima en 4.5, mientras que alrededor del 20% incluyó cuatro personas, 19% lo conformaron grupos de entre 6 y 10 integrantes, entre los más importantes.

Considerando todos los principales destinos turísticos del país, se observa que existe una predilección por algunos lugares en particular, incluyendo Acapulco con 13% del gusto de los paseantes, Cuernavaca 4%, Puerto Vallarta 4%, Veracruz, Puebla y Cancún 3% cada uno; el resto se distribuye en otros destinos nacionales. Sobresale en dicha estimación, la prevalencia de la entidad y particularmente la capital del estado por arriba de estados que cuentan con una vocación en turismo, dada su disponibilidad de playas como objeto central de las visitas. En este sentido, los principales motivos para vacacionar fueron para descansar (41%), visitar familiares (24%), diversión y placer 11% cada uno y aquellos que eligieron sol y playa alrededor del 4% del total nacional.

Por tanto, los destinos turísticos son asociados a diversos tipos de actividad de las que destacan asolearse, diversiones acuáticas para Cancún y Acapulco en particular; mientras que conocer historia y patrimonio puede ser encontrado en Guanajuato y Oaxaca. Al mismo tiempo, la gastronomía está asociada a Puebla y Oaxaca; por el contrario, Distrito Federal es relacionado con compras y grandes museos, así como actividades nocturnas. Cuernavaca particularmente, se asoció con la práctica de actividades al aire libre, así como con el ejercicio y la relajación (SECTUR, 2005).

La segunda “temporada vacacional de verano” es entre los meses de julio y agosto. Nuevamente, la composición de los grupos de viaje fue en familia alrededor del 53%, la familia extendida 31% y el 17% con amigos, sin embargo el promedio de personas de los grupos fue de cuatro personas alrededor del 20%, tres 21% y 2 personas 22% (SECTUR, 2005). De la misma forma que en el primer periodo vacacional, el gusto de los viajeros por los destinos fue hacia Acapulco 13%, Puerto Vallarta 6%, Cuernavaca 5%, Cancún 4% y Puerto de Veracruz 4% principalmente. También sobresalen como motivos de la visita al destino el descanso con 29%, visitar familiares 28%, diversión 16%, sol y playa 11%.

En cada periodo vacacional el promedio de visitas al destino fue de cuatro a diez veces (40%), mientras que 44% entre una y tres visitas y el 16% ha visitado más de diez veces. Derivado de la revisión de cada destino turístico, Puerto Vallarta y Tampico promedian de una a tres, mientras que Acapulco, Cuernavaca, Cancún y Veracruz de cuatro a diez.

Es por demás relevante mencionar que entre los sitios más visitados, Cuernavaca es el único destino que no es playa ni tiene una amplia infraestructura turística.

Ahora bien, las características de los visitantes o de sus patrones de consumo permiten describir los beneficios económicos asociados al sector. En primera instancia, es posible mencionar que los lugares de hospedaje fueron hotel y casa de familiares con 39 y 38% respectivamente. Aunado a ello, se describe un consumo o aprovechamiento de servicios asociados; por ejemplo, el gasto promedio de los viajeros fue de \$9 001.00, sin embargo 43% registro gastos entre dos y seis mil pesos, mientras que 13% gastó entre seis y ocho mil pesos, un 10% entre mil y dos mil pesos.

Los patrones de consumo pueden alcanzar hasta \$16 000.00, aunque estos representan solamente el 10% del mercado turístico. En este contexto, la distribución del gasto entre los servicios fue de la siguiente forma: alimentos 32%, transporte 28%, hospedaje 13%, actividades recreativas 7%, artesanías 7% y el 12% otras actividades.

Finalmente, es posible mencionar que el sector turístico representa beneficios económicos asociados al consumo que se generó en subsectores y ramas de actividad que proveen servicios necesarios para el funcionamiento del sector. No obstante, cabe mencionar que la entidad destaca en el mercado nacional dada su disponibilidad de condiciones ambientales regionalmente, lo cual queda demostrado en la importancia de los periodos vacacionales. Si bien, la entidad cuenta con una oferta de servicios turísticos, esta encuentra su principal proveedor en la capital del estado, ver figura 7.3.

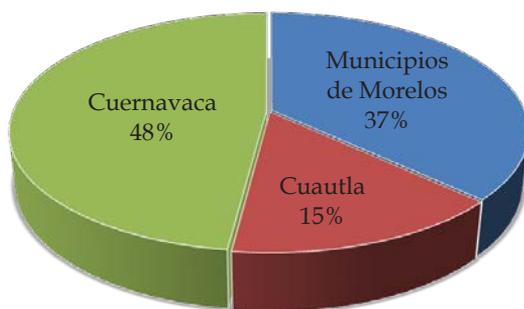


Figura 7.3. Destino de los visitantes en el estado de Morelos. **Fuente:** Elaboración propia basada en SECTUR, 2005

Cuernavaca representa el principal mercado de descanso o turístico debido a que está asociado a las condiciones ambientales locales y a la relativa accesibilidad de la ciudad

o su proximidad con la capital del país. En este sentido, y considerando los métodos de valoración ambiental de costo de viaje y valor hedónico¹⁸ la demanda de un área natural presenta variaciones cuando esta se ve modificada o contaminada (Freeman, 2003). De hecho, estos métodos permiten construir una curva de demanda cuyo desplazamiento depende del mejoramiento o deterioro ambiental, es decir dicha demanda está determinada en función del número de visitantes, el gasto por individuo y la calidad del ambiente, representada de la siguiente forma:

$$r = r(pr, M, q).$$

Donde pr implica el número de visitantes, M el gasto por individuo y q la calidad del ambiente. En el caso de Morelos, tal función de la demanda puede ser interpretada como que las actividades económicas asociadas al turismo se materializan en usos que compiten por la ocupación territorial, la cual afecta las condiciones ambientales y por lo tanto, su deterioro o transformación, pueden generar costos para la economía local. Es decir, validándose la hipótesis de que existe un impacto del cambio climático en el turismo local.

La calidad del ambiente (q) y la interpretación de los servicios ambientales

Al tomar en cuenta la importancia de los aspectos ambientales como indicadores estáticos de la competitividad, estos resultan factor relevante en el desarrollo de Cuernavaca o bien como base de toda su estructura tenemos que reconocer que todo sistema económico basa sus cimientos en la naturaleza, de una forma particularmente diferente, aunque en general, se reconoce su relevancia para la sociedad (Gómez, De Groot, 2007).

En este sentido, la dependencia humana de los ecosistemas es evidente en las economías de subsistencia ligadas al medio natural, donde las comunidades humanas utilizan los recursos de manera directa. Sin embargo, en economías de mercado o terciarias esto no es tan evidente (Gómez, De Groot, 2007), ya que estas tienen la capacidad económica para proveerse de recursos fuera de su entorno, pero a un costo extra. Todo esto debido al actual sistema de libre mercado que permite tales acciones a los países ricos a través de los mercados globales (Naredo, 2005).

En consecuencia, los ecosistemas son la fuente de los recursos tanto materiales como energéticos, los cuales son procesados en un sistema productivo hasta convertirlos en bienes y servicios de consumo; al mismo tiempo son el sumidero de los residuos

¹⁸ Estos métodos permiten construir una curva de demanda cuyo desplazamiento depende del mejoramiento o deterioro ambiental. Esta demanda es en función del número de visitantes, el gasto por individuo y la calidad del ambiente $r = r(pr, M, q)$.

derivados del metabolismo socioeconómico (Gómez, De Groot, 2007), son fuente y recipiente de los desechos producto del consumo.

Debido a ello, los servicios de los sistemas ecológicos y el *stock* del recurso natural son el soporte de vida sistémica de la tierra y contribuyen de manera directa o indirecta en el bienestar de la humanidad e incluso estos proveen un valor económico al planeta, asociado precisamente a dichos beneficios. De hecho, los ecosistemas abastecen de bienes y servicios tales como el agua, minerales, materias primas, energía, recursos genéticos de igual manera se cuenta con toda una serie de servicios como son la regulación del clima (Gómez, De Groot, 2007), el procesado de contaminantes, la depuración de las aguas, la actuación como sumideros de carbono, la prevención contra la erosión y las inundaciones (Dayli en Gómez, De Groot, 2007). Es en cierta medida lo que la ciencia económica ha tratado en términos de bienes y servicios pero desde una conceptualización de la sostenibilidad en un sentido más amplio como el de *servicios de los ecosistemas* y sus beneficios (Gómez, De Groot, 2007).

Sin embargo, es importante considerar la *resiliencia*, que es la capacidad limitada de la naturaleza y los ecosistemas para absorber el impacto creciente de la explotación de sus recursos tanto renovables como no renovables, la degradación de los ecosistemas y la absorción de los residuos o la contaminación que generan las actividades humanas en procesos de producción, distribución y consumo de tales bienes y servicios (Martínez Alier, Roca, 2000).

Las funciones, bienes y servicios de los ecosistemas adquieren una relevancia en el estudio de Robert Constanza y Rudolf de Groot, al señalar que sus servicios no son considerados en un mercado comercial, o adecuadamente cuantificados en términos comparables con los servicios económicos y el capital manufacturado; por lo tanto carecen de peso en la creación de políticas, lo que podría comprometer la sostenibilidad de los humanos en la biosfera (Constanza, *et al.*, 1997).

Las funciones se refieren a la variedad biológica, al hábitat, al sistema de propiedades o al proceso del ecosistema; en tanto que los servicios son los beneficios directos o indirectos que la humanidad recibe como la comida o productos provenientes del ecosistema. Se han identificado numerosas funciones y servicios, de las cuales Constanza y un grupo de investigadores emplearon 17 en su estudio de 1997. Sin embargo, en 2006 suman 30 en una tabla de clasificación presentada por Gómez y De Groot (2007) basada en otra tabla de los ecosistemas realizada por De Groot en 2006, ver tabla 7.1.

Tabla 7.1. Funciones, bienes y servicios de los ecosistemas

Nº	Servicio	Función	Ejemplos
1	Regulación atmosférica	Regulación de la composición química de la atmósfera.	CO ₂ /O ₂ balance, O ₃ para protección UVB y niveles SOx.
2	Regulación climática	Regulación global de la temperatura, precipitación, y otros procesos biológicamente regulados en niveles globales o locales.	Regulación del efecto invernadero, producción de dimetilsulfato para la formación de nubes.
3	Regulación de trastornos o perturbaciones	Condensación, humedad e integridad del ecosistema a las fluctuaciones del medio ambiente.	Protección de tormentas, control de torrentes, recuperación de sequía y otros aspectos de respuesta del hábitat a las variables del medio ambiente principalmente controladas por la estructura de la vegetación.
4	Regulación Hídrica	Regulación de las afluentes hidrológicas.	Aprovisionamiento de agua para la agricultura (irrigación), para procesos industriales o transportación.
5	Disponibilidad Hídrica	Almacenamiento y retención de agua.	Aprovisionamiento de agua para vertederos, reservas y acuíferos.
6	Control de erosión y retención de sedimentos	Retención del suelo dentro del ecosistema.	Prevención en la pérdida de suelo por el viento, derrames, u otros procesos de remoción, afectaciones en lagos y humedales.
7	Formación de suelo	Proceso de formación de suelo.	Aclimatación de rocas y acumulación de materia orgánica.
8	Ciclo de nutrientes	Almacenamiento, ciclo interno, procesamiento y adquisición de nutrientes.	Fijación de nitrógeno, N, P y otros nutrientes o ciclos.
9	Procesamiento de residuos	Recuperación de los nutrientes y remoción o descomposición de sobrantes, nutrientes o compostas.	Procesamiento de residuos, control de contaminación, desintoxicación.
10	Polinización	Movilización de los gametos florales.	Previsión de la polinización para la reproducción de la flora.
11	Control biológico	Regulación de poblaciones trópico-dinámicas.	Piedra angular de control entre depredadores y especies víctima, reducción de herbívoros por depredadores.
12	Refugio	Hábitat como residencia y resguardo de población transitoria.	Albergue y hábitat de especies migratorias, hábitat regional para especies recolectoras locales.
13	Producción alimenticia	Porción extraíble de la producción bruta del sector primario para alimento.	Producción acuícola, cosechas, horticultura, cacería, subsistencia agrícola.
14	Materias primas	Extracción de materias primas (producción bruta del sector primario).	Producción maderera, combustibles, forrajes.
15	Recursos genéticos	Manantial excepcional de materiales y productos.	Medicina, productos y materiales científicos, genes, patógenos de plantas y cosecha de insectos, especies ornamentales.
16	Recreación	Variedad de opciones y oportunidades en actividades recreativas.	Eco-turismo, deportes, recreaciones y actividades al aire libre.
17	Cultural	Usos no comerciales.	Estéticos, artísticos, educativos, espirituales, científicos o ecosistémicos.

Fuente: Elaboración propia con base en Constanza *et al.*, 1997.

Cabe hacer la aclaración que los servicios del ecosistema en algunos casos son producto de dos o más funciones y en otros casos una función contribuye a dos o más servicios lo que nos indica el grado de interdependencia entre funciones y servicios que son el soporte del bienestar humano (Gómez y De Groot, 2007).

Por tanto, es significativo cuestionarse acerca de los cambios en la cantidad o en la cualidad de los servicios de los ecosistemas y el recurso natural y plantearse cuál sería el impacto en el bienestar de la humanidad por tales variaciones que en mayor o menor escala pueden generar variaciones climáticas, alterar la composición química del aire o incluso afectar de manera drástica los ecosistemas impactando el costo-beneficio en las actividades humanas locales¹⁹.

En general los cambios de estas particulares formas de recurso natural y de los servicios económicos afectarán el costo o mantendrán los beneficios del bienestar del ser humano en la medida que este sea capaz de conservarlo, regenerarlo y reproducirlo dentro de una perspectiva de desarrollo sustentable. Esto es posible valorarlo pero en nuestro caso solo se hará un acercamiento a su estimación.

Cambio climático e impactos sociales

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPPC)²⁰ establecido por la Organización Meteorológica Mundial (WOM, 1988), así como el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (PNUMA) analizan la información sobre el cambio climático, considerando dentro de sus funciones el informar a través de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), las medidas que condujeron al “protocolo de Kioto” (ONU, 1998).²¹

Dicho documento resulta ser un acuerdo internacional para la reducción de seis contaminantes²² al 5% (art. 3, inciso 1) que generan el calentamiento global entre los años 2008-2012 (art. 3 inciso 7). Este documento entró en vigor el 16 de febrero de 2005 en el que se comprometieron los países signatarios a efectuar lo citado. El objetivo principal consiste en disminuir el cambio climático antropogénico por el efecto invernadero, el cual la ONU prevé que la temperatura media de la tierra aumente entre 1.4° y 5°C de aquí al año 2100.

¹⁹ Desde el punto de vista económico para Krugman (2008), esto es una deseconomía de escala.

²⁰ WMO, Organización Meteorológica Mundial. 1988.

²¹ ONU, Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático. 1998.

²² ONU. PROTOCOLO DE KYOTO. Ob. Cit. Anexo A, Gases que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5%.

El primer informe de 1990 fue una evaluación del aumento de los GEI por la actividad humana, donde se hacía un planteamiento en el aumento de la temperatura del 0.3°C por década proyectando un aumento en el nivel del mar de 65cm al año 2030 (ONU, 1990). La propuesta fue la reducción de emisiones en 60% lo que supondría acciones inmediatas para crear un instrumento internacional que contrarrestara los efectos GEI, culminando en la redacción del texto de “La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en 1992 y firmado por los países miembros en la “Cumbre de Río” de ese mismo año con 155 integrantes (ONU, 1990).

Por otra parte, el llamado “efecto invernadero prolongado” o de efecto agregado, es producido principalmente por el dióxido de carbono (60%), el gas existe de manera natural pero las actividades humanas han acelerado e incrementado su presencia en la atmósfera resultado de la combustión de carbón y gas natural.

El cambio climático en el medio ambiente puede ser considerable y el riesgo de sufrir daños de no revertir estos efectos, entre los efectos podrían estar el aumento en el nivel del mar entre 9 y 88 cm. para el año 2100 causando inundaciones, incrementarse las precipitaciones repercutiendo en los recursos hídricos, cambios en la gravedad y presencia frecuente de eventos climáticos extremos. Uno de los efectos más notables podría ser el desplazamiento de los ecosistemas y la extinción de sus especies que las habitan, de igual manera los fenómenos tendrían un efecto negativo en todas las actividades económicas, los asentamientos humanos y la salud (PNUMA, 2006).

Aproximación al estudio del estado del tiempo

Los factores temperatura y precipitación en el periodo 1981-2000²³ que en promedio definen el clima, se proponen para distinguir las ventajas comparativas asociadas a Cuernavaca respecto a las capitales de las entidades Distrito Federal, Tlaxcala, Puebla, Toluca, Pachuca y Querétaro.

Los climas de las ciudades comparadas se revisan con base en la clasificación climática de Köppen, modificado por García (1964) para la República Mexicana. Los climas de ciudades son: Pachuca BS1 w “(w) (i”) g, Querétaro BS1 w “(w) (i”) g, Toluca C (w2)(W)(bi’), Tlaxcala C (w1)(W)(bi’), Puebla C (w1)(W)(bi’) y Distrito Federal C (w1)(W)(bi’), los cuales pertenecen a la región climática llamada Meseta Central o de Anáhuac Vidal (2005); orográficamente sus atributos climáticos están bajo la influencia del Eje Volcánico Transversal de México.

La temperatura con referencia a la altitud entre los 2000 y 2800 se puntualiza porque corresponde a las vacaciones que elevan la movilidad turística, el clima es templado con

²³ Se analizan los datos de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y el Sistema Meteorológico nacional (SMN)

temperatura media anual entre 12 y 18°C, ahí se asientan Toluca y Distrito Federal, cabe señalar que la época caliente, de abril a septiembre, meses en que la temperatura es mayor a 18°C. Para la temperatura mensual mayo y junio, es más caliente Querétaro.

En estas ciudades la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales es isotermal, lo que significa que la diferencia entre temperatura del mes más caliente y el mes más frío es menor de 5°C, pero se puede encontrar también la poca oscilación con valores entre 5 y 7°C. La marcha anual de la temperatura es de tipo Ganges, presenta dos máximos típica de la zona intertropical; el primero es más marcado en la mayor parte de la región con el mes más caliente mayo, el segundo máximo se atenúa por la presencia de la lluvia. Las ciudades se encuentran en la región cuyo periodo de lluvias es determinado por los vientos alisios del noreste que regulan la lluvia por las desviaciones que el relieve produce, este produce un papel importante en la distribución de la lluvia, sin embargo, es el área con mayor intensidad de cambio de uso del suelo del país.

En este sentido, el clima de la Ciudad de México se ciñe a la clasificación climática universal de Köppen, que establece las categorías de templado (Cw) en su porción centro y sur, seco de tipo estepa en la parte norte y oriente donde las lluvias son deficitarias. Por su parte, la ciudad de Pachuca cuenta con un clima templado semi-frío con lluvias en verano, su temperatura media es de 14.8°C; su promedio de temperatura máxima es de 20.3°C, la mínima de 9.2°C y cuenta con una precipitación pluvial anual de 362.3 mm. Los vientos son dominantes durante 8 o 9 meses del año (CONAGUA, SMN, 2010).

Ahora bien, Pachuca, BS1 w“(w)(i”)g, Querétaro BS1w“(w)(i”)g, Toluca C(w2)(W)(bi’)g corresponden a climas semiáridos secos, con lluvias de verano porcentaje de lluvia invernal menor del 5 % con poca oscilación térmica. Tlaxcala C(w1)(W)(bi’), Puebla C(w1)(w)(bi’) y Distrito Federal (estación Iztapalapa) C(w1)(w)(bi’) corresponden al grupo de los templados semifríos subhúmedos, con verano fresco y largo.

Por tanto, el origen de las ventajas comparativas de Cuernavaca, esta ciudad pertenece a la región climática de la Cuenca del Balsas también con influencia en el norte del Eje Volcánico transversal. La temperatura se distribuye en pisos altitudinales, esta capital se encuentra entre los 1000 y 2000 msnm con una temperatura media anual entre 18 y 22°C que ofrece mayor confort pero que se encuentra seriamente en riesgo por los cambios de uso del suelo que modifican la cubierta vegetal cuya función es el amortiguamiento de los cambios de temperatura.

La marcha anual de la temperatura es la siguiente: el mes más frío es enero en tanto el más caliente es mayo, esta circunstancia define la marcha de la temperatura como tipo

Ganges. La oscilación térmica es isotermal como resultado del abrigo que le brindan las montañas del norte. Un atributo útil para planear las actividades turísticas es la canícula que consiste en una sensible disminución de la lluvia la estación lluviosa que corresponde al verano cuando se incrementa por la presencia de los ciclones tropicales y por las condiciones generales de la atmosfera cuyas modificaciones globales son evidentes en intensidad y frecuencia. En términos de planeación turística existen dos épocas bien definidas la lluviosa que inicia en mayo y termina en octubre y la época seca que abarca de diciembre a abril, ver figura 7.4.

El régimen de lluvias es de verano con un porcentaje de lluvia invernal del 5%. El clima es un semicálido A(C) con temperatura media anual entre 18 y 22°C se localizan entre los 1300 y 2000 Cuernavaca se encuentra a 1560 msnm. Es un clima de transición entre el cálido del valle y el templado de la ladera sur del Chichinautzin de cuya salud dependen las ventajas comparativas.

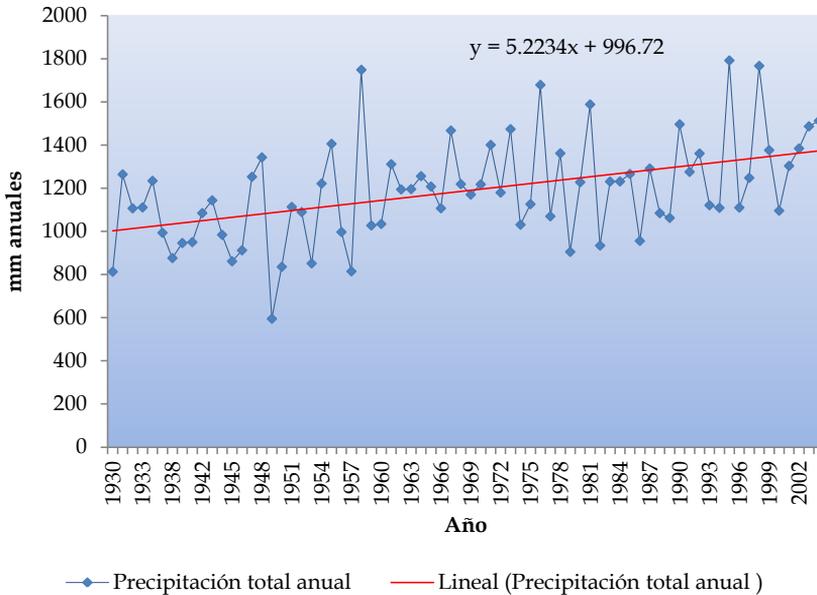


Figura 7.4. Precipitación total anual (mm) en el estado de Morelos, período 1930-2002. Fuente: Elaboración propia con base en Taboada, *et al.* 2009.

En términos económicos, el aprovechamiento ecológico de la ciudad está asociado a la comodidad que otorga la isotermalidad, esta es un servicio ambiental para actividades al aire libre que otorga ventaja comparativa con las ciudades citadas cuyos climas son extremosos.

Considerando las temperaturas máximas y mínimas promedio, se observa tendencias respectivas a la baja de la temperatura mínima promedio y a la alza de la temperatura máxima promedio. Tales movimientos se hacen más notorios a partir de la década de los noventas, abriendo un compás de separación entre ambos registros climáticos como se aprecia en la figura 7.5.

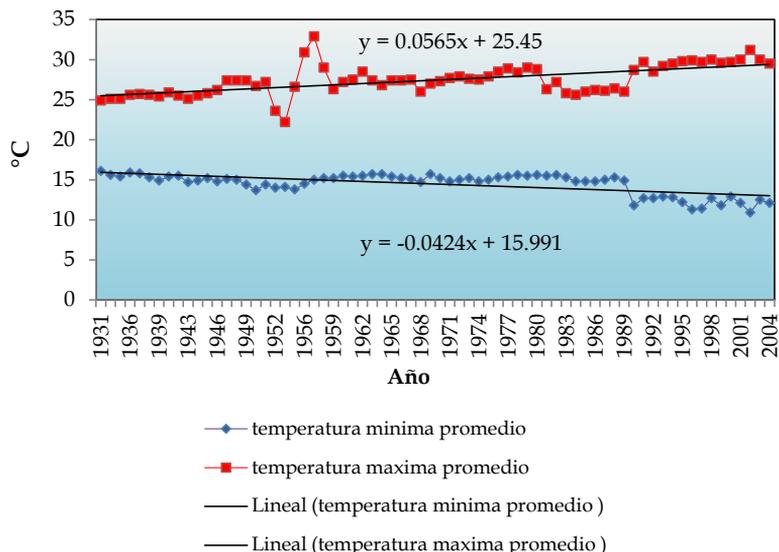


Figura 7.5. Temperatura mínima y máxima promedio en °C en el estado de Morelos, período 1931-2004. Fuente: Elaboración propia con base en Taboada *et al.* 2009.

Determinantes de la transformación ambiental local

En una primera aproximación, los indicadores de precipitación, temperaturas máximas o mínimas, reflejan una transformación progresiva. Para comprobar los efectos locales del cambio climático, resulta necesario analizar tales circunstancias a la luz de posibles factores generales causantes. Por tanto, se integran para tal fin una relación entre crecimiento urbano, deforestación (sustitución de bosque) y la oscilación térmica.

La oscilación térmica también registra una tendencia ascendente entre 1931 y 2003 como se aprecia en la figura 7.6. Dicho factor refleja unas condiciones de menor confort para las actividades al aire libre, consideradas centrales para la actividad turística de la entidad.

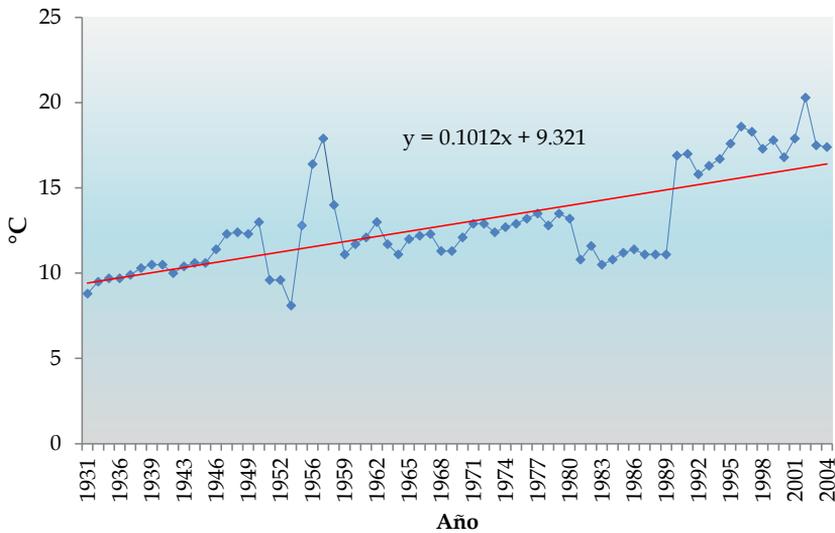


Figura 7.6. Oscilación térmica en el estado de Morelos en el período de 1931 a 2004.
Fuente: Elaboración propia con base en Taboada *et al.*, 2009.

Respecto al incremento del área urbana en Cuernavaca se tiene un crecimiento en constante ascenso. Prácticamente desde el registro de 1940 con 324.25 has ha aumentado a 2157.25 has en el año 2000, lo cual representa un aumento del 665% de incorporación de suelo a uso urbano en 40 años, ver tabla 7.2.

Tabla 7.2. Incremento de área urbana en Cuernavaca

Período	Incremento (ha)
1940	324.25
1950	422
1960	574.5
1970	1305
1980	1543
1990	1456
2000	2157.25

Fuente: Elaboración propia con base en SAHOP, 1982, Plan de Ordenamiento de la Zona Conurbada de Cuernavaca; INEGI, PDUCCPM, 2003.

En este sentido, la interrelación de la oscilación térmica y el crecimiento urbano, permite señalar la tendencia a la alza de ambas variables; incluso se aprecia un aumento más pronunciado en la extensión de la ciudad, en tanto la oscilación presenta un ascenso con menor intensidad. Sin embargo, es a partir de la década de los setentas que se hace más evidente el ascenso de ambas, en la figura 7.7 se observa que el punto de inflexión se presenta en 1967.

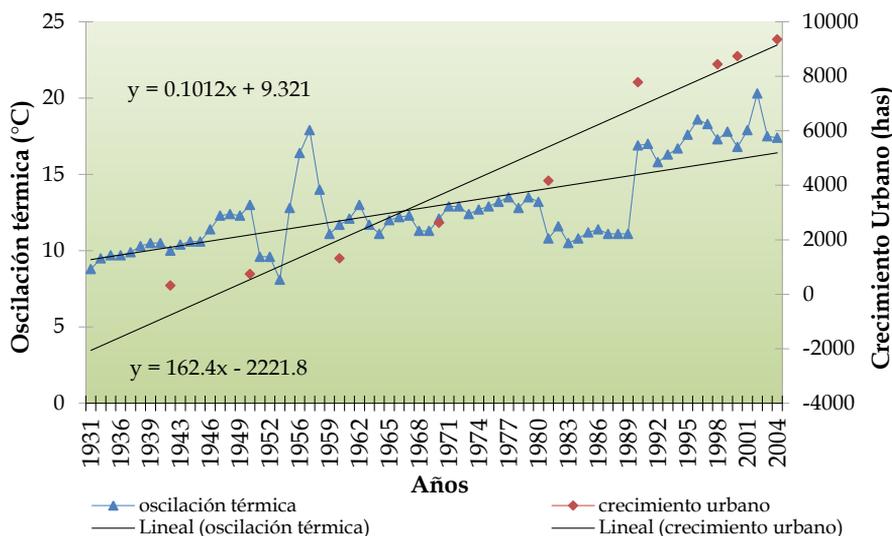


Figura 7.7. Oscilación térmica y crecimiento urbano en Cuernavaca, Morelos. **Fuente:** Elaboración propia con base en Taboada *et al.* 2009; INEGI, PDUCCPM, 2003.

De acuerdo a los registros del PDUCCPM (2003), el crecimiento del área urbana, así como el desplazamiento de zonas agrícolas hacia las áreas de bosque producen una sustitución de los mismos, lo cual permite señalar que las áreas forestales entre 1947 y 2003 exhiben pérdidas irreversibles como se puede observar en la tabla 7.3.

Derivado de relacionar los datos de sustitución forestal con la precipitación pluvial, se observa en la figura 7.8, la tendencia de esta última es al alza, la cual resulta ser inversamente proporcional a la pérdida de área forestal. Cabe mencionar que se estima del uso de suelo primario en el municipio la existencia de 4230.66 ha entre suelo erosionado y de áreas sin uso que se podrían incorporar al rubro forestal.

Tabla 7.3. Pérdida de áreas forestales en Cuernavaca.

Año	Sustitución de bosque %	Área Forestal (has)
1947	53.78	109196190
1973	48.15	97764904
1993	43.17	87653394
1997	32	65189276
2003	24.88	50927100

Fuente: Elaboración propia con datos de SAHOP, 1982, Plan de Ordenamiento de la Zona Conurbada de Cuernavaca; INEGI, PDUCPMC, 2003.

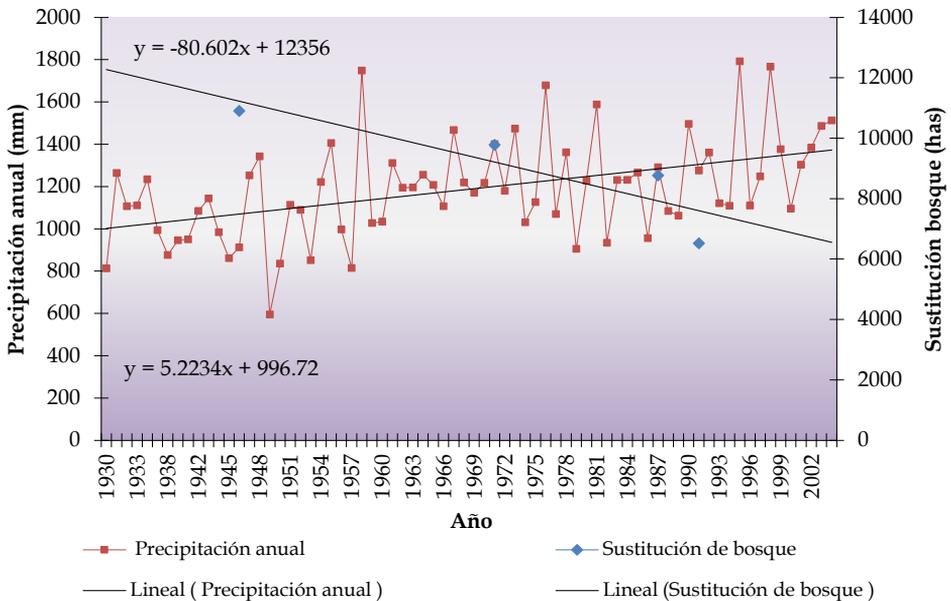


Figura 7.8. Precipitación pluvial y sustitución de bosque en el municipio de Cuernavaca, período 1930-2004. **Fuente:** Elaboración propia con base en Taboada *et al.*, 2009; INEGI, PDUCPMC, 2003.

Se puede señalar que Cuernavaca tiene actividades turísticas relevantes que están asociadas y condicionadas por factores climáticos. Dichos factores están supeditados a los aspectos ambientales, los cuales son utilizados, explotados, alterados o destruidos

por las actividades del ser humano, tales como el crecimiento urbano, los cambios de usos del suelo y la deforestación producto de las dinámicas de producción y acumulación económica.

Efectos económicos del cambio climático en el turismo

Los aspectos a revisar derivados de las transformaciones del estado del tiempo local, tienen que ver con los efectos económicos. En esta medida, se tiene una aproximación a la dimensión del cambio climático en sectores que dependen directamente del ambiente o de su estado de conservación. Morelos es una entidad con una notable actividad turística; Cuernavaca en particular, concentra el mercado del sector y su consecuente producción económica.

El mercado turístico está condicionado por la cantidad de visitantes a la entidad, quienes encuentran ciertas condiciones ambientales de confort mínimo respecto a la región central del país. La transformación de indicadores del estado del tiempo es en primera instancia una muestra de los impactos generales del cambio climático, pero también un acercamiento a la falta de estrategias territoriales menos dañinas, como lo demuestra la consistente tasa de crecimiento urbano o la tasa de deforestación.

En esta medida, la cantidad de turistas disminuyen como una explicación directa de los efectos ambientales, dado que se vuelve menos atractivo un sitio que es para esparcimiento. La única validez de tal hipótesis tiene que ver con el ingreso de visitantes o con su transformación reciente a la luz de los determinantes ambientales locales.

La cantidad de visitantes para la última década, refleja una disminución de aproximadamente 100,000 personas entre los años 2000 y 2005, mostrando posteriormente un ligero incremento en el año 2010, como se observa en la figura 7.9. Esta disminución puede asociarse, según el modelo de costo de viaje y precios hedónicos, al consumo *per cápita* durante la visita. Por tanto, la reducción aproximada del 12% en la última década.

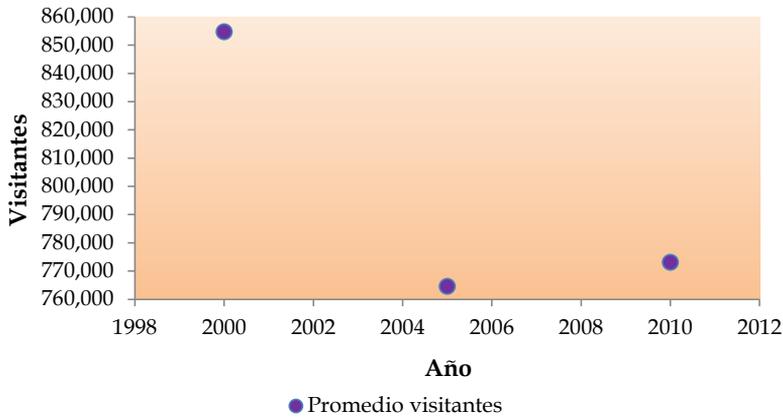


Figura 7.9. Promedio anual de turistas en Cuernavaca, período 1998-2012. **Fuente:** elaboración propia basada en SECTUR, 2011.

El consumo per cápita o la cantidad de servicios asociados al turismo que deja de percibirse resulta en una pérdida de beneficios de las condiciones ambientales locales, dicho de otra forma del servicio ambiental de isothermalidad, comparativamente *mejor* que aquel presentado en la región central del país. Asumiendo tal eje de discusión, existe evidencia de la disminución de los sectores asociados al turismo en este periodo como se observa en la figura 7.10.

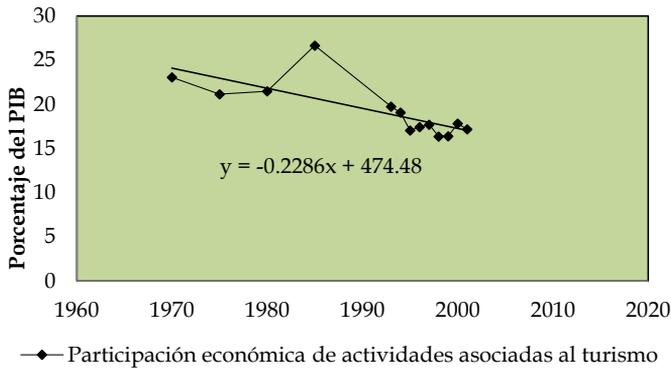


Figura 7.10. Participación de las actividades asociadas al turismo 1960-2010. **Fuente:** elaboración propia basada en INEGI, 2009.

En términos absolutos, los servicios asociados al turismo expresan un incremento, explicado en alguna medida por el incremento de los costos generales de los servicios locales, pero en términos relativos, el porcentaje ha demostrado un decrecimiento progresivo. Asumiendo la hipótesis de que pr implica el número de visitantes, M el gasto por individuo y q la calidad del ambiente, como factores determinantes de la demanda de visitantes turísticos, es posible comentar que se demuestra consistentemente un decremento de visitantes y de la calidad del ambiente, desplazando negativamente la curva de la demanda prevista para notación de costo de viaje, como se observa en la figura 7.11.

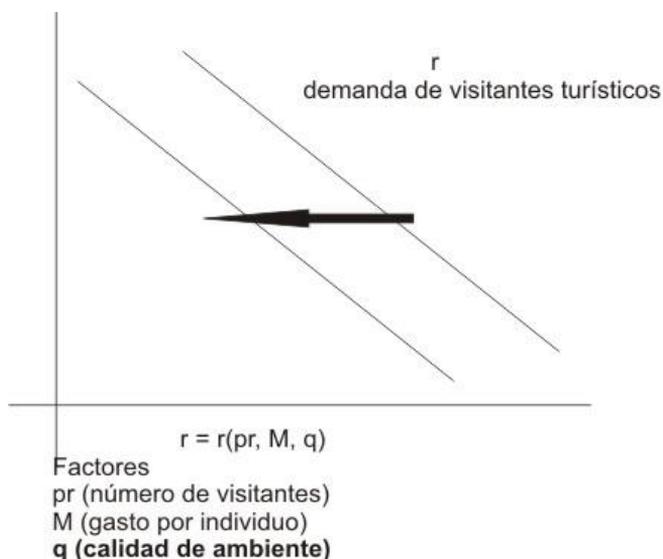


Figura 7.11. Desplazamiento de la curva de demanda de visitantes turísticos. Elaboración propia.

Finalmente, la instrumentación de políticas es un pendiente para los sectores en los que el ambiente interviene de manera directa; es de una responsabilidad vigente, modificar los planes y programas urbanos, así como todas aquellas actividades que demuestren consistentemente un aprovechamiento ambiental directo. Aún cuando, en la práctica todas debieran tender a ello.

Referencias bibliográficas

- Banco Mundial, 2005, Generación de Ingresos y Protección Social para los Pobres, México.
- Cabrero, E., Orihuela, I., Ziccardi, A., 2003, Ciudades competitivas-ciudades cooperativas: Conceptos claves y construcción de un índice para ciudades mexicanas, México: Centro de Investigación y Docencia Económicas.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2004, La inversión extranjera directa en América Latina y el Caribe. Informe 1997, Santiago.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Sistema Meteorológico Nacional (SMN), 2010, México.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2007, Delimitación de las zonas metropolitanas de México, México.
- Constanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannot, B., Limburg, K., Naeem, ., O'Neill, R., Paruelo, J., Raskin, R., Sutton, P., Van den Belt, M., 1997, The value of the world's ecosystem services and natural capital en *Nature*, vol. 387, pp 253-260.
- Dussel, E., 2000, La inversión Extranjera en México. Santiago: Comisión Económica para América Latina.
- Freeman, A., 2003, *The Measurement of Environmental and Resource Values; Theory and Methods*. Washington: Resources For The Futures.
- Gómez E., De Groot, R., 2007, Capital Natural y Funciones de los Ecosistemas: Explorando las Bases Ecológicas de la Economía en Ecosistemas, vol. 16, núm. 3, pp 4-14.
- Ibarra, D., 2004, Los laberintos del orden internacional: La importación de reformas en *Revista de la CEPAL*, Núm. 82, pp 7-18.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2006, Sistema de Cuentas Nacionales, PIB por entidad federativa 2001-2006, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2009, Los grandes sectores en breve Análisis comparativo Censos Económicos 2004-2009, México.
- Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI); Plan de Desarrollo Urbano de Centro de Población del Municipio de Cuernavaca (PDUICPM), 2003. Cuernavaca.
- Instituto Nacional del Federalismo y el Desarrollo Municipal (INAFED), 2005, Sistema de Información Municipal, Enciclopedia de los Municipios 2005, México: Secretaría de Gobernación.
- Kozac, D., 2011, Fragmentación Urbana y Neoliberalismo Global. En Pradilla, E., Ciudades compactas, dispersas, fragmentadas, (pp. 13-62). México: Universidad Autónoma Metropolitana; Miguel Ángel Porrúa.
- Krugman, P., 1994, Competitiveness: a Dangerous Obsession, *Foreign Affairs*, vol. 74, Núm. 2, pp. 28-44.

- Krugman, P., 1996, Making Sense of the Competitiveness Debate en *Oxford Review of Economic Policy*, vol. 12, Núm. 3, pp 483-499.
- Krugman, P., Wells, R., Olney, M., L., 2008, *Fundamentos de Economía*, Barcelona: Reverté.
- Kunz Bolaños, I., Valverde, C., González, J., 1996, Cambios en la estructura jerárquica del sistema nacional de asentamientos de México en *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol. 11, Núm. 31, pp 139-172.
- Martínez Alier, J.; Roca, J. (2001). *Economía ecológica y política ambiental*, México: Fondo de Cultura Económica.
- Moori-Koenig, V., Yoguel, G., 1998, El desarrollo de capacidades innovativas de las firmas en un medio de escaso desarrollo del sistema local de innovación, Argentina. Instituto de Industrias.
- Naredo, J., M., 2005, *Las raíces económicas del deterioro económico y social*, Madrid: Siglo XXI.
- Negrete, M., E., 1999, Desconcentración poblacional en la región Centro de México en *Estudios Demográficos y Urbanos*, vol.14, núm. 2, pp. 313-352.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 1990, *Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, Nueva York.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 1992, *Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, Nueva York.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 1998, *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (CMNUCC)*, Nueva York.
- Organización de las Naciones Unidas, (ONU) Organización Mundial del Turismo (OMT), 2001. *Cuenta Satélite del Turismo. Recomendaciones sobre el marco conceptual*, Nueva York.
- Plan Nacional de Desarrollo (PND), 2007. México: Poder Ejecutivo Federal.
- Porter, M., 1997, Competitive advantage, agglomeration economies and regional policy en *International Regional Science Review*, vol. 19, Núm. 1, pp. 85-93.
- Pradilla, E., *Los territorios del neoliberalismo en América Latina*, Porrúa, México, 2009, p. 306.
- Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (PNUMA), Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2006. *El Cambio Climático en América Latina y El Caribe*, Kenia.
- Richardson, H., W., 1980, Polarization Reversal in Developing Countries, en *Papers of the Regional Science Association*, Núm. 45, pp. 67-85.
- Ruiz Chiapetto, C., 1986, El Desarrollo urbano de México, realidades y conjeturas en *Estudios demográficos y urbanos*, vol. 14, Núm. 41, pp 313-352.
- Ruiz, M., García, C., Sayer, J., A., *Los Servicios Ambientales de los Bosques en Ecosistemas*, Vol. 16, núm. 3, pp. 80-89.
- Sassen, S.2006, *Cities in a world economy*, Pine Forge Press, Unites states of America.

- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2001. Plan Nacional de desarrollo Urbano y Ordenamiento Territorial. Resumen Ejecutivo 2001-2006 (PNDUOT). México.
- Secretaría de Turismo (SECTUR) 2011. Compendio Estadístico del Turismo en México. México, DF.
- Secretaría de Turismo (SECTUR), 2005, Hábitos de consumo del turista nacional, Temporada vacacional de Semana Santa, 2005, Reporte Global., México.
- Secretaría de Turismo (SECTUR), 2005, Hábitos de consumo del turista nacional, Temporada vacacional de verano 2005, Reporte Total. México.
- Secretaría de Turismo y Medio Ambiente. (2004). Hacia la sustentabilidad en barrios y centros históricos; Textos del IV seminario-taller de la red mexicana de ciudades hacia la sustentabilidad. Ettinger McEnulty, C.; Iracheta Cenecorta A. (Comps.), México.
- Sobrinó, J., 1998, Competitividad industrial en el sistema urbano nacional 1983-1993, México: El Colegio Mexiquense.
- Sobrinó, J., 2002, Competitividad y ventajas competitivas: revisión teórica y ejercicio de aplicación en 30 ciudades de México en Estudios Demográficos y Urbanos, vol.17, núm. 2, pp 311-361.
- Taboada, M., Granjeno, C., Guadarrama, O., R., 2009, Normales climatológicas (Temperatura y Precipitación) del estado de Morelos. México: Centro de Investigaciones Biológicas. 258 pp.
- Vázquez, A., 2000, Desarrollo endógeno y globalización en Eure, Vol. 26, núm. 79, pp 47-65.

El cambio climático se atribuye a la variabilidad natural del clima y, directa o indirectamente, a las actividades humanas, las cuales alteran la composición de la atmósfera terrestre. Asimismo, tiene implicaciones ambientales, sociales, económicas y políticas que deben ser atendidas.

En este contexto, es necesario desarrollar estrategias que permitan enfrentar los efectos de este fenómeno. Para ello, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM) coordinó la creación del Programa de Acciones ante el Cambio Climático en el Estado de Morelos, a través de un grupo de especialistas de diferentes instituciones y trabajando estrechamente con dependencias de los gobiernos estatal y federal.

Esta obra es resultado de dicho trabajo. En ella se presentan los resultados del análisis climático y los escenarios del clima para los años 2020, 2050 y 2080; además, se estudia la vulnerabilidad de sectores clave, definida como una función de la exposición climática, de la sensibilidad y de la capacidad de adaptación.

El documento está organizado en capítulos de la siguiente manera: en el primero se presenta una descripción general del medio físico y sociodemográfico de Morelos; en el segundo se presentan los escenarios de cambio climático y su regionalización en el estado.

Del tercero al séptimo capítulo, se muestran los resultados obtenidos de los estudios de vulnerabilidad en los rubros del recurso hídrico, biodiversidad, agricultura de temporal, salud y turismo, respectivamente. Además, con base en las expectativas de la variabilidad del clima, se presentan conclusiones y recomendaciones para cada uno de los sectores.



Secretaría
de Desarrollo
Sustentable

SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES



ISBN: 978-607-7771-95-1



9 786077 777195 11

CAMBIO CLIMÁTICO

Vulnerabilidad de sectores clave en el estado de Morelos
se terminó de imprimir en el mes de Junio de 2013,
en los talleres de Dicograf, S.A. de C.V.
Poder Legislativo 304, Cuernavaca, Morelos.
La edición consta de 500 ejemplares
para su composición se utilizó el tipo Book Antiqua.